



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN SEDE BOGOTÁ

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE BAGAZO DE CAÑA PANELERA

JORGE ARMANDO VILLALBA VIDALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2014

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE BAGAZO DE
CAÑA PANELERA

JORGE ARMANDO VILLALBA VIDALES
Cód. 02822368

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título
de: Magister en Ingeniería en Ingeniería Mecánica

Director:
Ph.D. NELSON ARZOLA DE LA PEÑA

Línea de Investigación:
Fuentes no convencionales de energía

Grupo de Investigación:
Diseño Óptimo Multidisciplinario (OPTIMUN)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda brindada por los estudiantes de la asignatura proyecto aplicado de ingeniería, a las Ingenieras Lili Tatiana Clavijo y Danitza María Cortés. También agradezco a mis padres, mi familia, en especial a Mabel Villalba, sin cuyo apoyo esto no se podría haber logrado. Por último agradezco todos los funcionarios de la Universidad Nacional que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

El estudio de la cinética de secado de biomasa como mecanismo para mejorar la eficiencia de los procesos de transformación en el sector agropecuario, cobra importancia debido a la baja eficiencia que tienen en general los procesos agroindustriales utilizados en el país. Lo cual es especialmente evidente en los procesos productivos de pequeña y mediana escala en la agroindustria panelera. Actualmente los trapiches paneleros usan el bagazo como fuente de energía térmica en los procesos de clarificación, encalado, evaporación y concentración. Sin embargo, debido a la baja eficiencia con la que normalmente se lleva a cabo el proceso de combustión, se recurre al uso de combustibles adicionales, siendo usados principalmente madera y llantas. Estos materiales ocasionan serios problemas ambientales, además de incrementar los costos de producción. En este trabajo se presentan los resultados del estudio experimental de la cinética de secado del bagazo de caña panelera. El objetivo de esta investigación es determinar las condiciones óptimas del proceso de secado, con el fin de contar con información suficiente para el diseño de un secador en campo, el cuál pueda ser operado por ejemplo con energía solar. La investigación se centra en el estudio de la influencia de la temperatura y el tamaño de fibra, tanto en la humedad final de la fibra, como en la cinética de secado, observándose una mayor influencia del tamaño de fibra en la humedad final de la muestra.

Palabras clave: Secado, Biomasa, Desechos agrícolas, Bagazo de caña, Panela.

ABSTRACT

The study of drying biomass kinetics as a tool to improve the efficiency in process of transformations for agricultural industry, take relevance due to the low efficiency in agro industrial processes used in the country. This is especially evident in processes of production for small and medium scale panela's agroindustry. Nowadays, the panela sugar mills use bagasse like thermal energy source for clarification, whitewashing, evaporation and concentration processes. However, due to the low efficiency of the combustion; farmers require the use of additional fuels. Being used mainly firewood and tires, which generate heavy environmental problems, besides increase the cost of production. In this work the outcomes of the experimental study of drying kinetic of panela's cane bagasse are showed. The goal of the study is determinate the optimal conditions for drying process to get a base for design a real scale dryer, which could be operate by solar energy for example. This work emphasizes in the study of the influence of both parameter, temperature of the drying fluid and biomass fiber size, not only in the final moisture content of the biomass but also in the drying kinetic. Greater influence of biomass fiber size in the final moisture content of the sample is observed.

Keywords: Drying, Biomass, Farming waste, Cane Bagasse, Panela.

CONTENIDO

CONTENIDO	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xv
LISTA DE ANEXOS	xvi
NOMENCLATURA	17
1 INTRODUCCIÓN.....	20
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
1.2.1 Pregunta de Investigación	22
1.3 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.3.1 Objetivo General.....	22
1.3.2 Objetivos Específicos	23
1.4 Estructura del Documento	23
2 ANTECEDENTES.....	24
2.1 Biomasa.....	24
2.2 Bagazo de Caña	25
2.3 Uso de Biomasa como Combustible	27
2.4 Inconvenientes del Secado de Biomasa	29
2.5 Uso de Biomasa como Combustible	29
2.6 Proceso de Secado en una Partícula	29
2.7 Unidades de Secado	31
2.7.1 Clasificación de los Secadores.....	31
2.7.2 Secadores Indirectos	32
2.7.3 Secadores Directos	35
2.7.4 Secadores Rotativos.....	35
2.7.5 Secadores de Lecho Fluidizado.....	37
2.7.6 Secadores de Tambor	38
2.7.7 Secadores de Gases de Combustión	38
2.7.8 Secadores Tipo Horno.....	39

2.7.9	Secadores Solares	39
2.7.10	Secador en Pila en Flujo Cruzado	40
2.7.11	Secador Continuo con Circulación del Medio	41
2.7.12	Nuevas Tecnologías de Secado.....	42
2.8	Estudios Experimentales del Secado	43
2.8.1	Secado de Arcilla.....	43
2.8.2	Secado de Subproductos Agrícolas.....	45
2.8.3	Secado de Papa y Zanahoria	46
2.8.4	Secado de Biomasa en Pila.....	47
2.8.5	Secado de Bagazo	48
2.8.6	Bio-secado de Residuos Uva.....	49
2.9	Modelamiento Matemático.....	50
2.9.1	Formulación de Sistemas con Poros Grandes	51
2.9.2	Formulación del Sistema con Poros Pequeños	52
2.9.3	Modelos de Difusión Líquida	55
2.9.4	Teoría Capilar	57
2.9.5	Modelo de Condensación – Evaporación	57
2.9.6	Modelos Conservativos	57
2.9.7	Modelos Simplificados	60
2.9.8	Modelos Experimentales	62
2.9.9	Modelo Simplificado y Semi-Empírico	64
2.9.10	Formulación de Interfaz Localizada.....	65
3	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	67
3.1	Diseño y Construcción de la Unidad Experimental	67
3.1.1	Sistema de Potencia.....	67
3.1.2	Sistema de Control y de Adquisición de Datos.....	69
3.2	Resumen	72
3.3	Recolección de la Muestra.....	73
3.4	Hipótesis	73
3.5	Resultados Esperados del Desarrollo Experimental	74
3.6	Variables Experimentales	74

3.6.1	Variables Independientes	74
3.6.2	Variables Dependientes.....	84
3.7	Materiales	86
3.8	Tratamiento de los Datos.....	86
3.9	Tamaño de la Unidad Experimental.....	87
3.10	Número de Corridas.....	87
3.11	Preparación de la Muestra	87
3.12	Análisis Numérico	88
3.13	Resultados Esperados.....	89
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	90
4.1	Proceso de Análisis	90
4.1.1	Análisis de Varianza	91
4.1.2	Prueba de t de Student.....	92
4.1.3	Representación Gráfica	93
4.1.4	Análisis del Experimento	95
4.1.5	Modelo Empírico.....	96
4.1.6	Dispersión de Resultados para Muestras Generales.....	96
4.2	Estudio de la Cinética de Secado	100
4.2.1	Influencia del tamaño de fibra.....	101
4.2.2	Influencia de la Temperatura	103
4.3	Consumo Energético	105
5	CONTRASTE DE MODELOS EXISTENTES.....	106
5.1	Revisión de Modelos.....	106
5.2	Solución de los Modelos	106
5.3	Limitaciones del Modelado	107
5.4	Modelo de Chauhan para lecho profundo.....	107
5.4.1	Condiciones de Inicio.....	108
5.4.2	Condiciones de Frontera	108
5.4.3	Principales Suposiciones.....	108
5.5	Modelos para Capa Delgada	109
5.5.1	Modelo de Luikov Modificado	110

5.5.2	Modelo de Newton.....	112
5.5.3	Modelo de Henderson Pabis	115
5.6	Medición del calor específico del Bagazo de Caña	118
5.7	Discusión Sobre los Resultados Experimentales Obtenidos en la Presente Investigación y por otros Investigadores	120
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	122
6.1	Conclusiones	122
6.2	Trabajos Futuros.....	124
7	BIBLIOGRAFÍA.....	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de producción de panela. Adaptada de [8].	21
Figura 2. Tipos de biomasa. Tomado de [17].	25
Figura 3. Disponibilidad de la biomasa residual en Colombia. Tomado de [17].	26
Figura 4. Disponibilidad de residuos del cultivo de caña panelera. Tomado de [17].	28
Figura 5. Etapas de secado de un medio poroso. Tomado de [10].	30
Figura 6. Etapas del proceso de secado. Tomado de [10].	31
Figura 7. Secador rotatorio indirecto de contacto. Adaptado de [33].	33
Figura 8. Secador de vacío rotativo. Modificado de [33].	35
Figura 9. Secador rotativo. Modificado de [33].	36
Figura 10. Secador rotativo de persiana. Modificado de [28].	37
Figura 11. Secador Atmosférico de doble Tambor. Modificado de [33].	38
Figura 12. Secador solar por convección natural. Modificado de [35].	40
Figura 13. Secador en Pila. Modificado de [28].	41
Figura 14. Secador de una etapa y un paso. Modificado de [28].	42
Figura 15. Secador de múltiples etapas y único paso. Modificado de [28].	42
Figura 16. Secadora de múltiples pasos. Modificado de [28].	42
Figura 17. Esquema de secador solar, modificado de [37].	45
Figura 18. Distribución de termocuplas. Modificado de [38].	46
Figura 19. Comparación de sistemas de secado.	47
Figura 20. Zonas identificadas dentro de la región de secado. Modificado de [41].	48
Figura 21. Planta piloto de bio-secado. Tomado de [27].	49
Figura 22. Composición de la biomasa antes y después del secado. Modificado de [27].	49
Figura 23. Clasificación de los poros. Modificado de [46].	50
Figura 24. Clasificación de modelos SHMT en medio poroso. Modificado de [45].	51
Figura 25. Esquema de un medio poroso no saturado. Modificado de [45].	52
Figura 26. Secador a escala de laboratorio. a) vista general; b) diagrama esquemático de la disposición de componentes principales.	68
Figura 27. Banco de resistencias con potencia total de 9kW.	69
Figura 28. Vista superior de la tarjeta Arduino Mega. Tomado de [72].	70
Figura 29. Sensor DTH11. Modificado de [73].	70
Figura 30. Balanza electrónica	72
Figura 31. Software de adquisición de datos.	72
Figura 32. Resumen del proceso experimental.	73

Figura 33. Muestras de bagazo de caña utilizadas en el desarrollo experimental.....	75
Figura 34. Software de medición de tamaño de fibra	76
Figura 35. Distancia de la media e histograma, Longitud de fibra. Muestra 1	77
Figura 36. Distancia de la media e histograma, longitud de fibra. Muestra 2	78
Figura 37. Distancia de la media e histograma, longitud de fibra. Muestra 3	79
Figura 38. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 1	80
Figura 39. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 2	80
Figura 40. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 3	81
Figura 41. Relación longitud de fibra – diámetro de la misma.....	82
Figura 42. Influencia del tamaño de fibra en la velocidad de flujo.....	85
Figura 43. Influencia de la temperatura en la velocidad de flujo	86
Figura 44. Influencia de la temperatura en la humedad final de la muestra.	94
Figura 45. Influencia del tamaño de fibra en la humedad final.	94
Figura 46. Superficie de respuesta para la humedad final vs. temperatura de entrada del medio de secado y el tamaño de fibra.....	95
Figura 47. Efectos principales para la humedad final.....	95
Figura 48. Diagrama de Pareto estandarizado para humedad final.	96
Figura 49. Influencia de la temperatura en la humedad final.....	97
Figura 50. Influencia del tamaño de fibra en la humedad final.	97
Figura 51. Dispersión humedad final para L=6 mm.....	98
Figura 52. Dispersión humedad final para L=24 mm.....	98
Figura 53. Dispersión humedad final para L=54mm.....	99
Figura 54. Dispersión humedad final para T=35°C.	99
Figura 55. Dispersión humedad final para T=45 °C.	100
Figura 56. Dispersión humedad final para T=60 °C.	100
Figura 57. Influencia de la temperatura para L= 6 mm.....	101
Figura 58. Perfil de humedad para longitud de fibra constante (L=24 mm).....	102
Figura 59. Perfil de humedad para longitud de fibra constante (L=54 mm).....	102
Figura 60. Perfil de humedad para temperatura constante T=35 °C	103
Figura 61. Perfil de humedad para longitud de fibra constante y T=45 °C.	104
Figura 62. Perfil de humedad para longitud de fibra constante y T=60 °C.	104
Figura 63. Curvas de consumo de energía por kilogramo de agua evaporada.	105
Figura 64. Esquema para el modelamiento matemático.	108
Figura 65. Comparación entre los perfiles de temperatura experimentales y mediante el modelo de Chauhan.....	109
Figura 66. Perfil de humedad dentro de la cámara de secado.....	109
Figura 67. Comparación entre los perfiles de temperatura experimentales (a) y mediante el modelo de Luikov Modificado (b).....	111

Figura 68. Variación de la humedad de la muestra, modelo Luikov Modificado.....	112
Figura 69. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{ mm}$	113
Figura 70. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{ mm}$	114
Figura 71. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{ mm}$	115
Figura 72. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{ mm}$	116
Figura 73. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{ mm}$	117
Figura 74. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{ mm}$	118
Figura 75. Curva de calor específico para Humedad = 12.5%	119
Figura 76. Curva de calor específico para Humedad = 50%	119
Figura 77. Curva de calor específico para Humedad = 30%	119
Figura 78. Influencia de la humedad en el calor específico de la muestra.	120
Figura 79. Perfiles de secado. Tomado de [42].	121
Figura 80. Perfil de humedad para temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$	131
Figura 81. Perfil de humedad para longitud de fibra constante $L=6\text{mm}$	131
Figura 82. Perfil de humedad para temperatura Constante $T=45^{\circ}\text{C}$	132
Figura 83. Perfil de humedad para longitud de fibra Constante $L = 24\text{mm}$	132
Figura 84. Perfil de humedad para temperatura constante $T = 60^{\circ}\text{C}$	133
Figura 85. Perfil de humedad para longitud de fibra constante $L = 54\text{mm}$	133
Figura 86. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$	134
Figura 87. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$	134
Figura 88. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$	135
Figura 89. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$	135
Figura 90. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$	136
Figura 91. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$	136
Figura 92. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$	137
Figura 93. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$	137
Figura 94. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$	138
Figura 95. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$	138
Figura 96. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$	139
Figura 97. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$	139
Figura 98. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$	140
Figura 99. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$	140

Figura 100. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura T=60°C	141
Figura 101. Perfil de temperatura sensor 1 para longitud de fibra constante L=24mm	142
Figura 102. Perfil de temperatura sensor 2 para longitud de fibra constante L=24mm	142
Figura 103. Perfil de temperatura sensor 2 para longitud de fibra constante L=24mm	143
Figura 104. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=24mm	143
Figura 105. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=24mm	144
Figura 106. Perfil de temperatura sensor 1 para longitud de fibra constante L=6mm	144
Figura 107. Perfil de temperatura Sensor 2 para longitud de fibra constante L=6mm	145
Figura 108. Perfil de temperatura sensor 3 para longitud de fibra constante L=6mm	145
Figura 109. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=6mm	146
Figura 110. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=6mm	146
Figura 111. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=54mm	147
Figura 112. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=54mm	147
Figura 113. Perfil de temperatura sensor 3 para longitud de fibra constante L=54mm	148
Figura 114. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=54mm	148
Figura 115. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=54mm	149
Figura 116. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante T=60°C	150
Figura 117. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante T=60°C	150
Figura 118. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante T=60°C	151
Figura 119. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante T=60°C	151

Figura 120. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante T=60°C	152
Figura 121. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante T=45°C	152
Figura 122. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante T=45°C	153
Figura 123. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante T=45°C	153
Figura 124. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante T=45°C	154
Figura 125. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante T=45°C	154
Figura 126. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante T=35°C	155
Figura 127. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante T=35°C	155
Figura 128. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante T=35°C	156
Figura 129. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante T=35°C	156
Figura 130. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante T=35°C	157
Figura 131. Perfil de humedad para el sensor 1 para longitud de fibra constante L=6mm	158
Figura 132. Perfil de humedad para el sensor 2 para longitud de fibra constante L=6mm	158
Figura 133. Perfil de humedad para el sensor 3 para longitud de fibra constante L=6mm	159
Figura 134. Perfil de humedad para el sensor 4 para longitud de fibra constante L=6mm	159
Figura 135. Perfil de humedad para el sensor 5 para longitud de fibra constante L=6mm	160
Figura 136. Perfil de temperatura en la cámara de secado T=35°C y L=6mm.	161
Figura 137. Perfil de temperatura en la cámara de secado T=35°C y L=24mm.	161
Figura 138. Perfil de temperatura en la cámara de secado T=35°C y L=54mm.	162
Figura 139. Perfil de temperatura en la cámara de secado T=45°C y L=6mm.	162

Figura 140. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{mm}$.	163
Figura 141. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{mm}$.	163
Figura 142. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{mm}$.	164
Figura 143. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{mm}$.	164
Figura 144. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{mm}$.	165
Figura 145. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=6\text{mm}$.	166
Figura 146. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=24\text{mm}$.	166
Figura 147. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=54\text{mm}$.	167
Figura 148. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ $L=6\text{mm}$.	167
Figura 149. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ $L=24\text{mm}$.	168
Figura 150. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ $L=54\text{mm}$.	168
Figura 151. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ $L=6\text{mm}$.	169
Figura 152. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ $L=24\text{mm}$.	169
Figura 153. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ $L=54\text{mm}$.	170

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Usos de los diferentes tipos de secadores de biomasa. Adaptada de [22].	34
Tabla 2. Principales características de los secadores. Modificado de [28].	44
Tabla 3. Clases de poros y su relación con procesos en alimentos [45].	51
Tabla 4. Modelos para secado no isotérmico. Tomado de [69].	63
Tabla 5. Modelos matemáticos de secado. Tomado de: [71], [42]	63
Tabla 6. Valores de difusividad efectiva del bagazo de caña de azúcar. Modificado de [42].	64
Tabla 7. Datos de cálculo del prototipo experimental.	68
Tabla 8. Características principales de la tarjeta Arduino Mega. Modificado de [72].	69
Tabla 9. Datos básicos del sensor DTH11. Modificado de [73].	70
Tabla 10. Características de la balanza.	71
Tabla 11. Resumen para la medición de tamaño de fibra	76
Tabla 12. Resultados test de normalidad de la muestras.....	76
Tabla 13. Resumen medición del diámetro medio de la fibra.....	78
Tabla 14. Resultados test de normalidad de la muestras.....	79
Tabla 15. Valores de longitud y diámetro de la fibra	81
Tabla 16. Descripción de las unidades experimentales	82
Tabla 17. Resultados de pesos obtenidos	83
Tabla 18. Tamaño de la unidad experimental	87
Tabla 19. Condiciones de experimentación	87
Tabla 20. Peso de la muestra.....	88
Tabla 21. Datos de humedad final de las 27 corridas	90
Tabla 22. Datos para el análisis ANOVA.....	91
Tabla 23. Resultados análisis ANOVA	92
Tabla 24. Codificación de muestras para la prueba de Student.	92
Tabla 25. Valores de la prueba t de Student para L constante	93
Tabla 26. Valores de la prueba t de Student para T constante.	93
Tabla 27. Resumen de propiedades para el modelo de Chauhan.	108
Tabla 28. Propiedades para el modelo de Luikov Modificado.	110
Tabla 29. Aproximación de resultados experimentales al modelo de Newton. ...	112
Tabla 30. Constantes adimensionales para el modelo de Henderson Pabis.....	116

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Perfiles de Humedad	131
ANEXO 2. Perfiles de temperatura para temperatura de medio constante	134
ANEXO 3. Perfiles de Temperatura para longitud de fibra constante	142
ANEXO 4. Humedad relativa del medio de secado	150
ANEXO 5. Influencia de la Longitud de fibra en la Humedad Relativa del Aire ...	158
ANEXO 6. Perfiles de temperatura al interior de la cámara de secado	161
ANEXO 7. Perfiles de humedad en la cámara de secado	166
ANEXO 8. Código Solución del Modelo de Luikov Modificado	171
ANEXO 9. Código Solución del Modelo de Transferencia de Calor y Masa	174
ANEXO 10. Código Solución Modelo de Chauhan	176
ANEXO 11. Código para el filtrado de los datos experimentales	180
ANEXO 12. Ejemplo de solución modelos empíricos	181

NOMENCLATURA

a, b, k, c, n, g, h : Constantes (Tabla 5)	g_{acc} : Aceleración de la gravedad (m/s^2)
A : área (m^2)	H : Relación de humedad del aire (kg/kg)
a : área específica de contacto ($1/cm$)	h : Coeficiente de transferencia de calor (W/m^2K), ($W/m^2°C$)
a_r : área de transferencia/ unidad de volumen ($1/m$)	H_e : Entalpía del aire (J/kg)
b, h : base húmeda	h_e : Entalpía (J/kg)
c : Concentración de masa (kg/m^3)	h_{mass} : Coeficiente de transferencia de masa (s/m)
C_m : Capacidad de humedad específica ($kg_{humedad}/kg_{materia\ seca} °M$)	h_m : Calor latente (kJ/kg)
C_n : Parámetro constante (Adimensional)	h_{fg} : Calor latente de vaporización (kJ/kg)
C_{ch} : Contenido de agua en la partícula (kg/m^3)	$h_{c,p-a}$: Transferencia de calor convectiva entre el producto y el aire (W/m^2K)
C_p : Capacidad del aire (kgm^2/kgN)	$h_{r,p-c}$: Transferencia de calor radiactiva entre el producto y la cubierta (W/m^2K)
c_p : Calor específico ($kJ/kg \cdot K$)	h_s : Calor de adsorción (J/kg)
C_q : Capacidad de Calor Específica (J/kgK)	h_v : Calor de desorción del agua J/kg
C_V : Capacidad calorífica volumétrica ($J/kg \cdot K$)	∇H_{mv} : Calor de vaporización del agua (J/kg)
D : Difusividad (m^2/s)	\dot{I} : Tasa de evaporación (kg/m^3s)
D_0 : Factor de pre-exponencial ($1/s$)	I_t : Radiación solar incidente (W/m^2)
D_{TV}, D_{TL} : Difusividad térmica inducida de vapor y líquido respectivamente (m^2/sK)	J_l : Flujo de líquidos (kg/m^2s)
$D_{\theta V}$: Difusividad isotérmica de vapor (m^2/s)	K_0 : Número de Kossovich (adimensional)
D_p : Espesor del producto (m)	K_d : Constante de secado ($1/h$)
E_{act} : Energía de activación (kJ/mol)	K_{dif} : Coeficiente de difusión (m^2/s)
E_a : Tasa de evaporación potencial (kg/m^2h)	K_c : coeficiente de transferencia de masa (cm/s)
F_p : Radiación solar que incide en el producto (adimensional)	K_H : Permeabilidad (m^3/m)
f_m : tasa de secado por unidad de área (kg/m^2s)	K, k, k_T : Conductividad térmica ($W/m \cdot K$), ($kJ/m \cdot K$)
G_{GB} : Velocidad través de la cama (kg/hm^2)	K_i : Coeficientes (ecuaciones 1 a 3)
G : Flujo de masa (kg/m^2s)	L : Espesor de la muestra, alto del colchón (m)
g : flujo de masa (kg/m^2s)	

L_v, L_w, L_p : Calor latente de vaporización ($J/kg, kJ/kg$)	$TDLA$: Caída de temperatura a lo largo de la pila (K)
Lu : Número de Luikov	T : Temperatura ($^{\circ}C, adimensional, K$)
m_l : Generación de líquido (kg/m^3s)	t : Tiempo (s, h)
m_b : Generación de humedad ligada (kg/m^3s)	u, v, w : Velocidad del flujo de aire en x, y, z (m/s)
m_p : Masa del producto (kg)	U, V, W : Componentes de la velocidad (adimensional)
M : Humedad ($kg\ de\ agua/kg\ sólido$)	U : Coeficiente de transferencia de calor en el colchón (W/m^3K)
M_k : Contenido de Humedad (Decimal)	V_c : Volumen de la cámara de secado (m^3)
M_a : Potencial de Humedad ($^{\circ}M$)	W : Contenido de humedad (adimensional)
M_v : Concentración de vapor en los poros ($kg\ de\ agua/kg\ sólido$)	W : Contenido de matriz sólida (kg/m^3)
M_{wo} : Flujo de masa de madera (kg/h)	W_a : Humedad absoluta de aire ($kg_{agua}/kg_{aire\ seco}$)
\overline{M}_l : Humedad volumétrica promedio ($kg\ de\ agua/kg\ sólido$)	x, y, z : Posición, dirección ($m, adimensional$)
MR : Radio de Humedad (adimensional)	X : Contenido de humedad ($kg\ de\ agua/kg\ sólido$)
n : Flujo de masa (kg/m^2s)	\bar{X} : Contenido de humedad promedio a lo largo del camino de difusión ($kg\ de\ agua/kg\ sólido$)
P, p : Presión ($Pa, kN/m^2$)	Y : Humedad del aire (kg/kg)
p_e : Presión estática (Pa)	Letras Griegas
P_n : Número de Posnov	α : Absortancia (adimensional)
q : Flujo de calor conductivo o convectivo (W/m^2)	α_p : Permeabilidad (m^2)
\dot{q} : Fuente de calor (W/m^3)	α_T : Difusividad térmica (m^2/s)
q_i : Agua interna (kg/m^2)	β_n : Raíces de la función de Bessel (adimensional)
q_{eq} : Cantidad de agua de equilibrio (kg/m^2)	β_r : Tasa de calentamiento (K/s)
Q : Tasa de transferencia de calor (W)	ε : número de evaporación, porosidad, tortuosidad (adimensional)
r : Radio (m)	ε_v : Espacio vacío en la pila (adimensional)
R : Tasa de evaporación (kg/h)	ϕ : Difusividad (adimensional)
R_c : Radio cilíndrico (m)	ζ, ε : Factores de forma (adimensional)
R_g : Constante Universal de los Gases ($J/(mol \cdot K)$)	
s : Generación de energía W/m^3	
S_{ϕ} : Término de fuente (Adimensional)	

λ_a : Relación de humedad del aire de secado (Adimensional)	δ : Espesor medio (m)
λ_T : Conductividad térmica hipotética (J/mKs)	λ : Calor latente (kJ/kg)
λ_v : Calor latente de vaporización (kJ/kg)	GB: Cama de secado
μ : Viscosidad dinámica ($kg/m \cdot s$)($Pa \cdot s$)	g: Humedad del aire, gas
$\kappa, \eta, \alpha_e, \beta$: Parámetros empíricos (adimensional)	i_M : Material componente
γ : Coeficiente de expansión [adimensional]	i: Zona de deslizamiento, interface
ρ : Densidad (kg/m^3)	in: Entrada
ρ^* : Densidad real (kg/m^3)	l: Agua líquida
ρ_B : Densidad del material a granel ($kg_{muestra}/m^3_{muestra}$)	o: Inicial
ρ_m : Concentración de humedad en el producto ($kg_{agua}/kg_{producto}$)	out: Salida
ρ_s : Densidad de sólido seco ($kg_{sólido}/m^3_{muestra}$)	PM: Material poroso
τ : Tiempo (adimensional)	p: Producto
θ : Potencial de Humedad (adimensional)	pl: Líquido
θ_l : Contenido de agua volumétrico (adimensional)	s: Superficie, matriz sólida, partículas de madera
Γ : Coeficiente de difusión (adimensional)	t: Tiempo instantáneo
τ_c : Transmitancia de la cubierta (adimensional)	v: Vapor, volumétrico
Ψ : Contenido de humedad (adimensional)	w: Agua, madera
Ψ_c : Potencial capilar (Pa)	x,y: Direcciones x e y respectivamente.

Subíndices

- 1: Inicial
- 2: Final
- a: Aire
- c: Región central del lecho, cubierta, capilar
- e: Equilibrio
- eff: Efectiva
- f: Fluido, fluido en el grano/humedad final
- GR: Grano, cama de secado

1 INTRODUCCIÓN

En el presente documento se muestran los resultados de la investigación experimental de la cinética de secado de bagazo de caña panelera producido en un trapiche típico del municipio de San José de Isnos del departamento de Huila. El documento consta de la revisión y formulación del problema, una breve revisión de unidades de secado usadas industrialmente, así como estudios experimentales de la cinética de secado y revisión de modelos desarrollados para el mismo fin. También se hace un resumen detallado del proceso de fabricación de la unidad experimental, y una descripción del desarrollo de las corridas experimentales. A continuación se presenta un breve análisis y discusión de los resultados obtenidos en el proceso experimental. Por último se presenta una comparación de los resultados experimentales con algunos modelos teóricos presentes en la bibliografía especializada.

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el bagazo de caña se considera el subproducto no maderable más importante del mundo [1]. El cuál, además de ser producido en grandes cantidades, (para el año 2010 existían en Colombia aproximadamente 240.418 ha sembradas, lo que equivale a una producción anual total de 1'274.733 Ton) [2] posee un alto poder calorífico [1], se estima que sólo el bagazo y la paja de los cañaverales contienen el equivalente a cerca de 1 Ton de petróleo por cada Tonelada de azúcar producida [1].

En la actualidad, los trapiches paneleros consumen la totalidad del bagazo generado durante el proceso productivo. Sin embargo debido a la ineficiencia térmica de las hornillas, se hace necesario recurrir a la compra de combustibles adicionales como leña y caucho (llantas) [3] lo que ocasiona aumento en los costos de producción, además de un aumento considerable en las emisiones de material contaminante al aumentar la cantidad de combustible requerido [4]. Si se considera que en Colombia existen cerca de 20.000 unidades productoras (trapiches), y que la producción de panela representa el 6,7% del PIB agrícola [5] el desarrollo de tecnologías que mejoren la productividad del sector repercutiría en el mejoramiento de la calidad de vida de un amplio sector de la población.

Por otra parte, según estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [6] el uso de energías renovables y de desechos en Colombia constituye un renglón importante dentro de la canasta energética. Sin embargo, esto dista de ser un buen indicador del desarrollo energético del país. En Colombia el uso de biomasa residual se lleva a cabo en forma no tecnificada lo que produce afectación al medio ambiente y la salud de las personas, en especial en áreas rurales del país [7].

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Los trapiches paneleros usan los residuos propios de su proceso de producción (en especial el bagazo de caña), como fuente de energía térmica. Esta energía es usada en los procesos de evaporación, concentración, punteo y batido de la panela, como se observa en la Figura 1 [8]. Sin embargo, dado que la combustión se lleva a cabo en forma ineficiente, no se aprovecha completamente el potencial energético de dichos residuos. Por esta razón, los trapiches recurren a la compra de combustibles suplementarios [3]. Esto aumenta los costos de producción, y generan además peligrosas emisiones al medio ambiente, En especial cuando se usa como combustible sustituto llantas de vehículos [4].

Las emisiones de material contaminante ocasionadas por la combustión a aire abierto de llantas incluyen: material particulado, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (también asociados a la combustión de madera y bagazo). Adicional a esto, genera materiales peligrosos tales como: hidrocarburos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos, cloruro de hidrógeno, benceno, entre otros; y metales como: arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio [4].

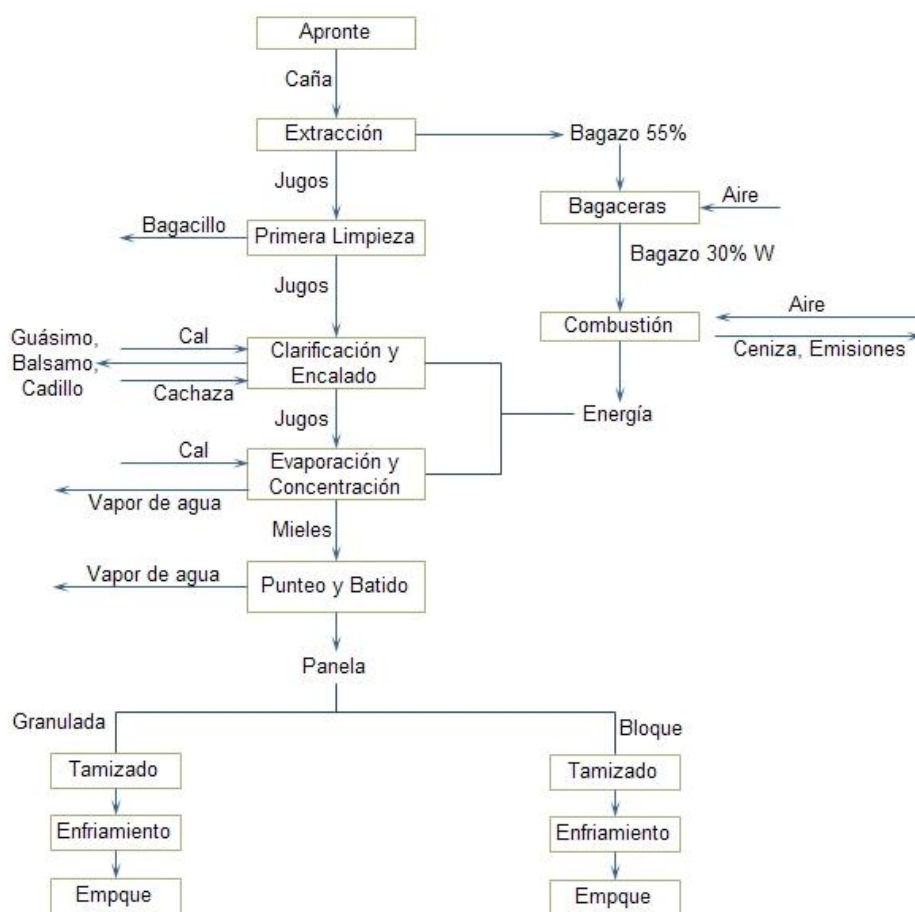


Figura 1. Proceso de producción de panela. Adaptada de [8].

Otro hecho importante para destacar, es que según estadísticas de la Agencia Internacional de Energía (IEA) [6], el uso de energías renovables y desechos como fuente primaria de energía, se ha mantenido más o menos constante en Colombia desde 1972 hasta 2008. Sin embargo, la importancia relativa que tiene esta fuente de energía dentro de la canasta energética local se reduce, debido a la poca eficiencia que presenta en el proceso de combustión [3]. En el caso particular del bagazo de caña, la baja eficiencia en el proceso de combustión es debida en gran medida al elevado contenido de humedad, la cual presenta una humedad promedio de 50% en b.h. [9]. Dicha humedad reduce la eficiencia de la combustión, debido a que gran parte del calor liberado durante el proceso de combustión se usa para evaporar el agua, y no es aprovechable [9].

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se debe considerar como un objetivo estratégico para el sector panelero, el desarrollo de tecnologías que les permita aumentar la eficiencia térmica del proceso de combustión y transferencia de calor en las hornillas. Esto con el fin de mejorar la competitividad así como, reducir las emisiones de sustancias contaminantes al aire. Adicional a esto, la posible generación de excedentes de bagazo seco podría dar la apertura de un mercado, para un subproducto antes considerado como desecho. Sin embargo, para que esto sea posible, es necesario el desarrollo de procesos de secado de residuos agrícolas, que sean eficientes y amigables con el entorno. Ya que de lo contrario, entraría en contradicción directa con el principal objetivo del proyecto, el cual es fomentar el uso sostenible de biomasa como fuente de energía. Estas nuevas tecnologías además deben ser simples de manipular y mantener, y no requerir conocimientos técnicos avanzados para el mismo, con el fin de posibilitar el acceso de dichas tecnologías en todas las regiones del país.

Ahora bien, en la actualidad existen pocas publicaciones acerca de la cinética de secado de bagazo de caña panelera en colchón, lo cual es una falencia a la hora de diseñar secadores piloto que permitan mejorar la eficiencia del proceso de producción de panela.

1.2.1 Pregunta de Investigación

¿Es posible mejorar la eficiencia y la eficacia del proceso de secado mediante la selección de las combinaciones adecuadas de tamaños de fibra y temperatura de secado del bagazo de caña panelera?

1.3 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo experimental que permita el estudio de la cinética del secado en colchón del bagazo de caña panelera, y contrastar los resultados con un modelo matemático existente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir una unidad que permita determinar experimentalmente la cinética de secado en colchón de bagazo de caña panelero, producido en el municipio de San José de Isnos del departamento del Huila.
- Determinar experimentalmente la cinética de secado del bagazo de caña panelera.
- Contrastar los resultados experimentales con resultados obtenidos mediante modelos matemáticos conocidos.

1.4 Estructura del Documento

En el primer capítulo, se encuentra una descripción completa del planteamiento del problema y objetivos generales del proyecto investigativo. En el segundo capítulo se presenta una revisión de los trabajos previos relacionados con el secado de material biológico, unidades de secado industriales y estudios experimentales y teóricos. En el tercer capítulo se explica el diseño del modelo del experimento, así como el diseño y construcción de la unidad experimental. El capítulo cuarto presenta los resultados del proceso experimental y su respectivo análisis. En el capítulo quinto se trabaja la formulación de los modelos matemáticos que se desarrollan con el fin de ser implementados como verificación de los resultados experimentales. Por último en el capítulo seis se presentan las conclusiones y posibles trabajos futuros.

2 ANTECEDENTES

La importancia del estudio del proceso de secado se evidenció en los estudios de Franzen quien en 1987 estimó que el consumo de energía para secado de alimentos a nivel mundial es de más de 2×10^8 kJ. Y de Strumillo quien en 1995 determinó que el 12% del consumo mundial de energía es destinado a los procesos de secado, los cuales fueron citados por Rodríguez en al [10], sin embargo, a pesar de la importancia del proceso a nivel industrial, existen muchos factores de la cinética que varían a lo largo del proceso de secado, que dificultan su modelado [11]. Adicional a esto, debido a la amplia diversidad de materiales y las condiciones del producto terminado, existen una amplia gama de tecnologías de secado y modelos que describen su cinética [12], dificultando de esta forma la formulación de un modelo unificado que permita estimar con precisión su cinética.

El secado involucra una transferencia simultánea de calor y masa, el cual depende tanto de las condiciones externas del sistema (temperatura, velocidad y humedad relativa del medio de secado), como de las condiciones internas (densidad, permeabilidad, porosidad y propiedades de absorción y desorción) [13]. EL proceso de secado es usado por múltiples razones dentro de las que se pueden destacar, preservación, reducción de volumen o peso, como proceso previo a otras transformaciones [10]. Es por esto, que la comprensión de su cinética se ha hecho necesaria a la hora de optimizar el proceso, reduciendo los tiempos de secado, la calidad de los productos y el consumo de energía. Actualmente existe una amplia gama de procesos de secado, de la misma forma, existen una gran variedad de modelos matemáticos [11]. Dichos modelos buscan predecir los perfiles de temperatura, humedad y presión durante el secado.

2.1 Biomasa

Se entiende por biomasa cualquier materia que se origina a través del proceso de la fotosíntesis de los vegetales. La biomasa está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, con menores contenidos de material volátil (terpeno, tanino, ácidos grasos, aceites y resinas), humedad y material mineral [14]. Siendo en este caso la celulosa el mayor componente [15]. La biomasa es un recurso muy variado debido a las diferencias en cuanto la producción y origen, lo cual influye en las características físico – químicas. La biomasa fue la primera fuente de energía conocida por el hombre y es usada para cubrir una gran variedad de necesidades incluyendo generación de electricidad, calefacción, cocción de alimentos etc. [16]. Adicional a esto, es considerada renovable porque forma parte de un flujo natural y repetitivo de los procesos de la naturaleza [17].

En Colombia, la Unidad de Planeación Minero Energética elaboró en el año 2006 un Atlas de potencial de biomasa residual, el cual muestra en detalle el potencial energético de biomasa residual para Colombia por sectores [17]. En dicho atlas, se divide los orígenes de la biomasa residual es tres. Sector agrícola, Sector

Pecuario, Sector de residuos sólidos. En la Figura 2 se presenta la descripción de los tipos de biomasa estudiados en él.

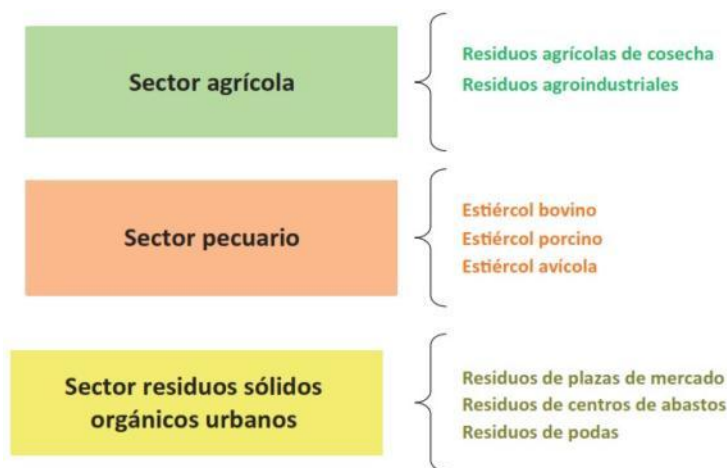


Figura 2. Tipos de biomasa. Tomado de [17].

En cuanto a los residuos del sector agrícola, están conformados por subproductos generados en los procesos de recolección y transformación de las cosechas. En la Figura 3 se observa la disponibilidad de biomasa residual en Colombia. Donde se puede observar que existe un potencial elevado y que se encuentra distribuido a lo largo del país [17]. Esta disponibilidad es posible debido al hecho que para la alimentación tanto del hombre como de los animales se usa únicamente el 10% de la biomasa producida. Por lo que queda un enorme excedente en estado sólido o en suspensión que de no ser manejada adecuadamente puede generar problemas ambientales a mediano y largo plazo [14].

2.2 Bagazo de Caña

La caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.) es una planta monocotiledónea que pertenece a la línea de las gramíneas. El origen exacto de la caña de azúcar es todavía materia de investigación, sin embargo, se considera que este pudo haber sido al archipiélago de Melanesia de Nueva Guinea 8.000 a 15.000 años antes de Cristo. En 1493 Cristóbal Colón en su segundo viaje la trajo a las islas del caribe en especial a la isla La Española (actual República Dominicana y Haití), desde donde se difundió posteriormente a Cuba, Puerto Rico, México, Colombia y Perú. A Colombia se cree fue introducida por primera vez en 1510 en Santa María de la Antigua del Darien, actual Valle del Cauca [18].

La caña de azúcar representa el producto más cultivado para producción de sacarosa a nivel mundial. Aproximadamente un 13,5% del su peso es azúcar. Adicional a esto posee una cantidad igual de fibras de bagazo de desecho. Dicho bagazo (principalmente celulosa) es quemado en los molinos para generar el vapor necesario en la producción de azúcar [19]. Además de la celulosa que

represente en promedio el 45,8%, el bagazo está compuesto por hemicelulosa (31,3%) y lignina (22,9%) [20]. Por otra parte, su composición química es: Carbono (49,8%), Oxígeno (43,9%), Hidrógeno (6%), Nitrógeno (0,2%) y Azufre (0,06%), dichos porcentajes están en base seca libre de cenizas [19] [21].

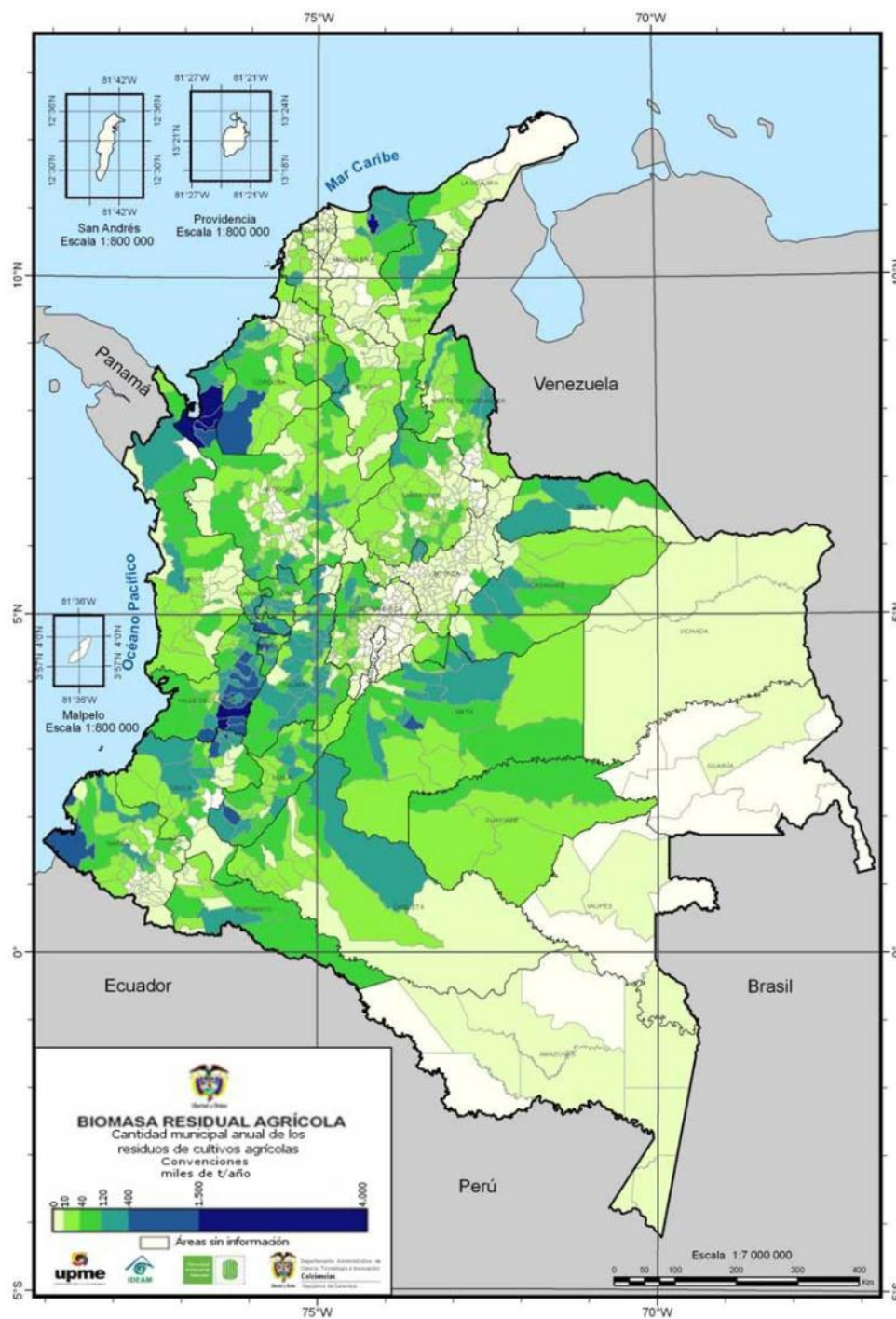


Figura 3. Disponibilidad de la biomasa residual en Colombia. Tomado de [17].

El cultivo de caña en Colombia ocupa el segundo lugar en extensión con 249.384 hectáreas (según estadísticas del Ministerio de Agricultura del 2004) después del café. Del total cultivado, el 61% es dedicado a la producción de panela, 32% a la producción de azúcar y 7% a la producción de mieles, guarapos y forrajes [18]. A nivel mundial, la panela es producida en 25 países, siendo Colombia el segundo productor después de la India. La producción de panela es una de las principales actividades agrícolas del país y esto se debe a que representa el 7.3% del PIB agrícola, por el área cultivada (249.384 hectáreas), generación de empleo rural (25 millones de jornales anuales) porque a esta actividad está vinculada alrededor de 350.000 personas el 12% de la población rural activa. Y porque alrededor de la panela se genera el equivalente a 120.000 empleos permanentes [18]. En Colombia se cosecharon en 2010 aproximadamente 201.695 ha con una producción real de 1.274.733 Ton, lo que equivale a un rendimiento de 6,32 Ton por ha [2].

Se estima que en Colombia existen 70.000 unidades agrícolas que cultivan caña panelera y aproximadamente 15.000 trapiches en los que se elabora panela y miel de caña. Dichas unidades de producción están presentes en 27 de los 32 municipios del país. Siendo los principales productores los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Huila y Santander (Figura 4) [17],[18].

En cuanto al interés energético del bagazo, se puede realizar el análisis que se presenta a continuación. La energía específica de la celulosa pura es aproximadamente 17 MJ/kg y de la lignina pura aproximadamente 27 MJ/kg. Sin embargo, debido a que el bagazo es una mezcla de 45% de celulosa, 25% hemicelulosa y 30 de lignina, el poder calorífico se reduce a 19 MJ/kg. Sin embargo este valor se reduce a 8 – 9 MJ/kg debido a que el bagazo contiene en promedio una humedad del 50%. Por otra parte, la temperatura de llama adiabática del bagazo húmedo con un 40% de exceso de aire es de 1250°C [19]. Finalmente se resalta que la cantidad de energía presente en el bagazo es suficiente para cubrir las necesidades de energía mecánica y térmica para el funcionamiento del molino [19].

2.3 Uso de Biomasa como Combustible

El uso de biomasa seca genera las siguientes ventajas en comparación con el uso de biomasa húmeda. Mejoramiento de poder calorífico. Homogenización del poder calorífico resultante de la variación en el contenido de humedad. Menores dimensiones de los quemadores. Menor cantidad de material sólido no quemado y componentes gaseosos desde el quemador [22]. Por otra parte la presencia de humedad, aumenta la cantidad de materiales no quemados, lo que aumenta la cantidad de material orgánico volátil emitido durante la combustión [22].

El uso de quemadores con la capacidad de usar los diferentes tipos de biomasa como combustible, ha disparado el desarrollo de investigaciones en todo el mundo encaminadas a mejorar la eficiencia de los mismos. Dado que el contenido de

humedad de la biomasa (el cual oscila entre el 50 y el 63% b.h.) [23], es uno de los factores más influyentes en la eficiencia del proceso de combustión, se han desarrollado un número importante de modelos y tecnologías destinadas a aumentar la eficiencia del proceso de secado. En la actualidad los quemadores comerciales operan con eficiencias aceptables para un rango de humedad entre 30 y el 40% b.h. [22] el uso de combustibles con humedades bajo este rango permite una mejora significativa en la eficiencia. Por otra parte, el secado de biomasa es ampliamente usado en la manufactura de pellets o briquetas para los cuales el contenido de humedad debe encontrarse entre 10 – 20% b.h. [24], siendo el valor óptimo para la densificación del bagazo de caña del 10% b.h. [25].

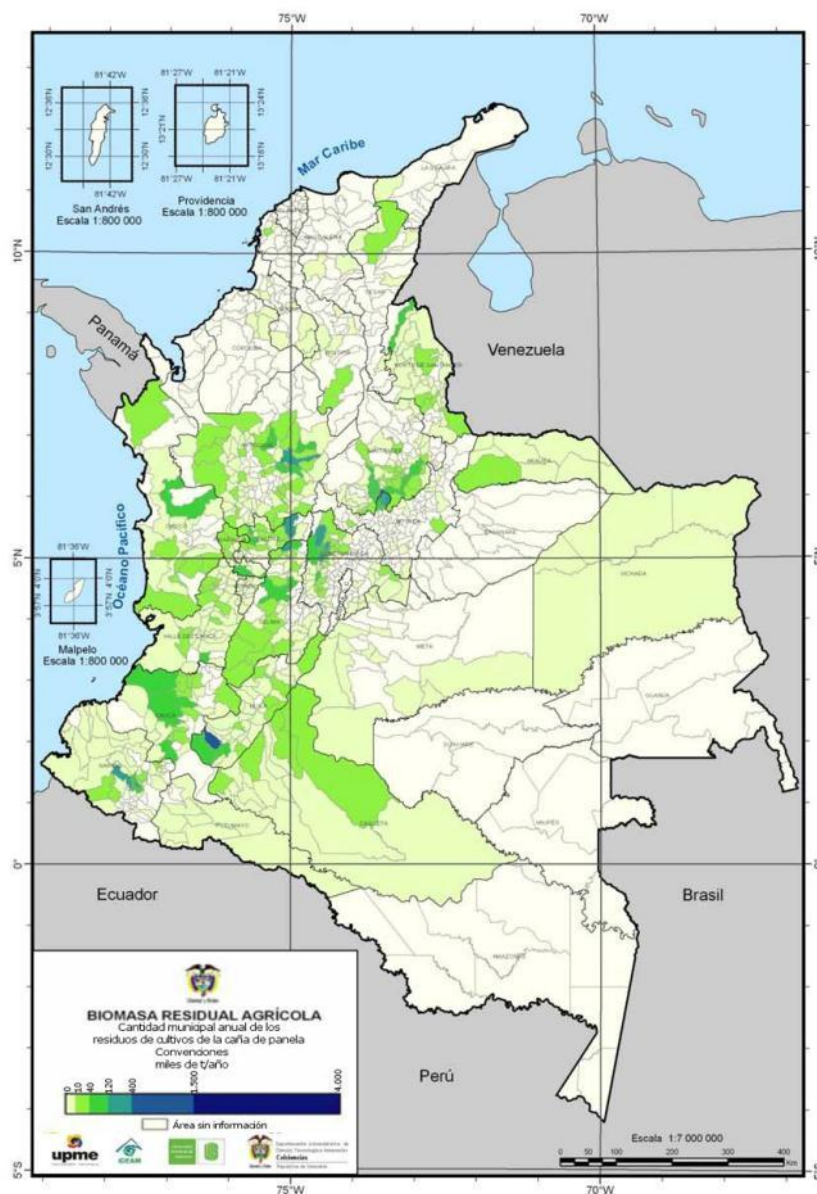


Figura 4. Disponibilidad de residuos del cultivo de caña panelera. Tomado de [17].

2.4 Inconvenientes del Secado de Biomasa

Uno de los principales inconvenientes a la hora de secar biomasa, es su baja temperatura de autoignición (entre 260 y 280 °C). Lo anterior limita la temperatura máxima del medio de secado, en especial cuando se trabajan con aire. Adicional a esto, las temperaturas elevadas generan mayores emisiones de material orgánico volátil [23], [26], [27]. Las emisiones provienen principalmente de la vaporización de componentes orgánicos, material particulado atrapado en el flujo y degradación térmica de la materia [15]. Las principales emisiones son monoterpenos, las cuales se incrementan con temperaturas superiores a 100 °C [15]. Sin embargo, es aceptable trabajar a temperaturas superiores a 150 °C con tiempos de residencia bajos (<1h) [28]. Por otra parte, el flujo de biomasa puede contener piedras, arena y otros elementos inadecuados, que pueden deteriorar el quemador [22].

Los principales materiales condensables son ácidos grasos, ácidos de resina, diterpenos y triterpenos. Aunque estos últimos sólo están presentes a temperaturas entre 180 y 220°C [15]. Por otra parte, el secado de material biológico a temperaturas elevadas ocasiona el deterioro del producto [29] y la reducción del poder calorífico del mismo [30].

2.5 Uso de Biomasa como Combustible

El uso de biomasa como fuente de energía constituye en una de las principales fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles. En la actualidad la biomasa representa el 6% del consumo de energía no alimenticia del mundo. Ahora bien dicho uso se lleva a cabo en sistemas de baja eficiencia y alta polución en sistemas de calefacción y cocción poco controlados [31].

Uno de los principales inconvenientes de la combustión de biomasa como fuente de energía, es la emisión de material particulado al medio ambiente. La combustión de biomasa es el mayor contribuyente de gases tóxicos. Adicional a esto contribuye al incremento de partículas suspendidas en la atmósfera. Dicho fenómeno se ve representado en el deterioro de la calidad del aire en áreas con presencia de caña de azúcar en el estado de Sao Pablo, durante las estaciones de quemado, donde el material particulado se duplica con respecto a la estación de cosecha [32]. Por otra parte, la presencia de compuestos alcalinos, metales de tierras alcalinas, en combinación con otros componentes de los biocombustibles como silicio y azufre y potenciado por la presencia de cloro son responsables de reacciones indeseadas durante el proceso de combustión [31].

2.6 Proceso de Secado en una Partícula

Se define el secado como el proceso de remoción de material volátil (humedad) de una matriz sólida mediante la aplicación de calor. El movimiento de humedad al interior de materiales porosos se puede llevar a cabo de una de las siguientes formas [10]:

1. Difusión líquida: debido a los gradientes de concentración de líquido.
2. Difusión de vapor: debido a los gradientes de presión parcial dentro del material.
3. Movimiento líquido: debido a las fuerzas capilares
4. Flujo de líquido o vapor: Debido a la diferencia de presiones que existe entre el interior del poro y el medio secante.
5. Efusión (flujo de Knudsen): se presenta cuando el camino libre entre las moléculas de vapor es del orden del diámetro de los poros.
6. Movimiento de líquido debido a la gravedad.
7. Difusión superficial.

Adicional a esto, las principales etapas de secado al interior del poro se puede ver en la Figura 5. Se considera que durante el periodo de secado constante predomina el flujo capilar, mientras que durante el periodo de rapidez decreciente predominan la condensación, la evaporación y flujo de vapor [10].

El proceso de secado suele dividirse en dos etapas, la primera se conoce como periodo de rapidez constante y la segunda como periodo de rapidez decreciente. Sin embargo algunos autores consideran que estos dos periodos se pueden subdividir en otras etapas. En la Figura 6 se muestra dichas etapas. El periodo A-B se conoce como etapa de calentamiento. B-C etapa de rapidez de secado constante. C-D primer periodo de rapidez de secado decreciente. D-E segundo periodo de rapidez decreciente [10].

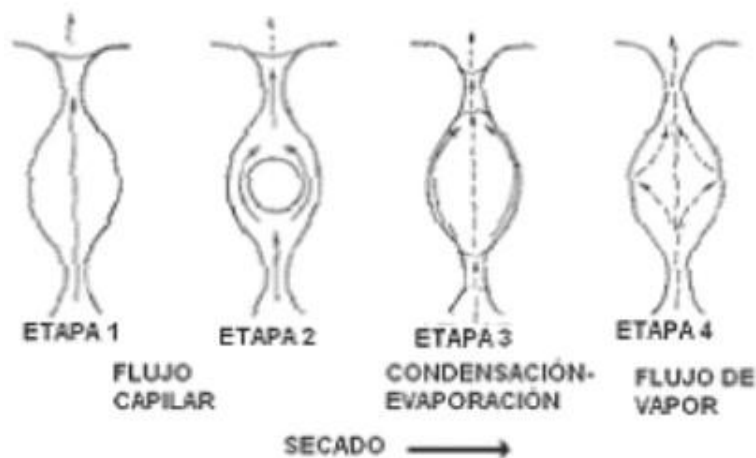


Figura 5. Etapas de secado de un medio poroso. Tomado de [10].

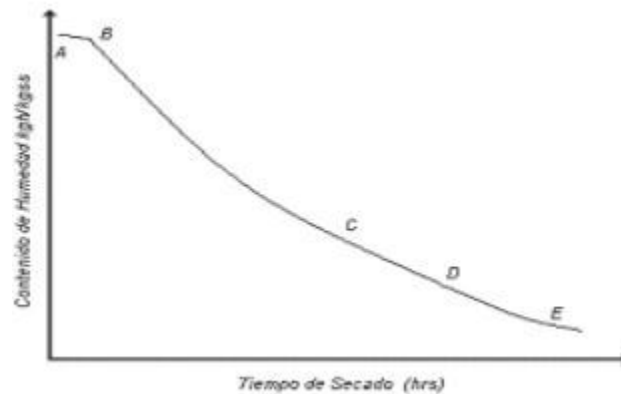


Figura 6. Etapas del proceso de secado. Tomado de [10].

2.7 Unidades de Secado

Debido a la naturaleza del proceso de secado, así como la diversidad de materias primas y de productos requeridos, existe una amplia gama de instalaciones industriales de secado. Las cuales se pueden clasificar según el medio de secado, mecanismo de transferencia de calor y método de transporte de material dentro del secador. En la sección 2.7.1 se muestra una clasificación de las unidades comerciales existentes.

2.7.1 Clasificación de los Secadores

Holmberg [22], presenta la siguiente clasificación de los secadores de biomasa usados comercialmente.

- Suministro de calor al material
 - Convección (Secador directo)
 - Conducción (Secador indirecto)
 - Combinado (directo e indirecto)
- Medio de secado
 - Gases de combustión
 - Aire
 - Vapor
- Mecanismo de transporte del material dentro del secador
 - Secador Rotatorio (secador de tambor)
 - Secador de banda
 - Secador de tornillo
 - Secador de lecho fluidizado
 - Secador de cascada
 - Secador neumático

Adicional a esto, el mismo autor [22] resume las principales características de los diferentes tipos de secadores de biomasa, mostrando las ventajas, desventajas y condiciones de trabajo de cada una de las unidades experimentales de secado de biomasa (Ver Tabla 1).

2.7.2 Secadores Indirectos

Los secadores de contacto o conductivos, son aquellos secadores en los que el medio de secado (aire, vapor, gases de combustión) no entran en contacto con el material a ser secado. En vez de ello, el material es secado mediante el contacto con una superficie caliente.

El rango de temperaturas de funcionamiento oscila entre -40°C (secado por congelamiento) y 300°C (en el caso de secadores indirectos calentados por el producto de la combustión). Este tipo de secadores tiene generalmente una eficiencia térmica mayor que los secadores directos, debido a que la energía perdida en los gases de salida es reducida. Además, los gases de salida necesitan menor limpieza [33].

Secador de Pila en Bandeja

En este tipo de secador indirecto básico, el material a ser secado es colocado, en bandejas sobre estantes, donde es calentado por un medio de calentamiento. Dicho calentamiento puede ser de un flujo a alta presión con temperatura de moderada a alta a un flujo sub-atmosférico de baja temperatura de operación a aceite caliente, e incluso por calentamiento eléctrico. Las bandejas son generalmente de metal para asegurar la transferencia de calor entre éstas y los estantes. La cantidad de bandejas varía de 1 a más de 20 en grandes unidades [33].

Una de las principales ventajas de este modelo de secadores es la posibilidad de trabajar con materiales sensibles a altas temperaturas. Dicho proceso suele llevarse en vacío, con lo cual se reduce la temperatura de ebullición del líquido a ser extraído. Dicho líquido puede ser tóxico, o tener valor comercial y por tanto requiere ser capturado. Este tipo de secadores es usado principalmente en productos sensibles a altas temperaturas o materiales fácilmente oxidables [33].

Secadores Rotatorios Indirectos de Contacto

El tipo más común de secador rotatorio indirecto de contacto, es el secador de flujo de vapor en tubo (Figura 7). Este tipo de secadores consiste básicamente en una carcasa cilíndrica, normalmente inclinada levemente (de 1 a 5°) con la horizontal con el fin de facilitar el transporte del medio de secado [33].

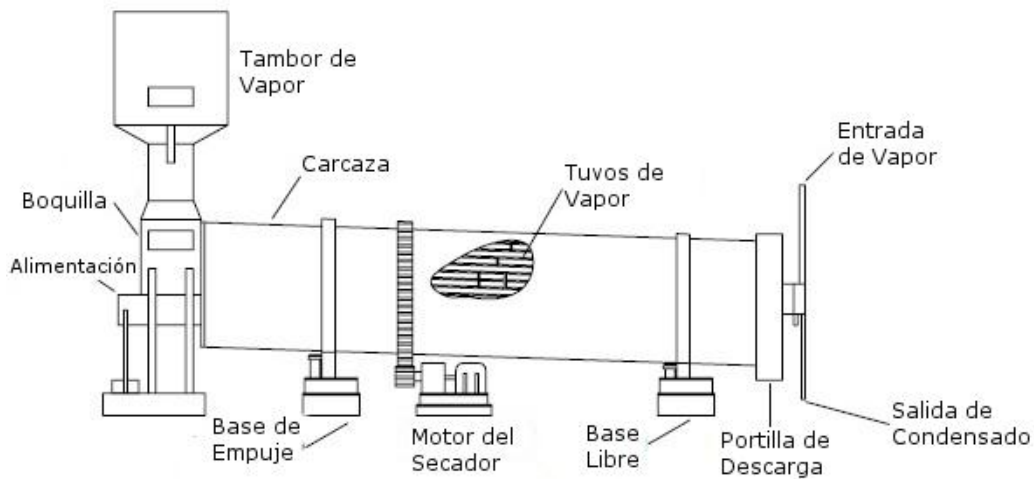


Figura 7. Secador rotatorio indirecto de contacto. Adaptado de [33].

Este dispositivo cuenta con tubos por donde circula vapor, dispuestos simétricamente (en una, dos o tres filas concéntricas) alrededor del perímetro, y rotan dentro de él [33]. Se usa principalmente bajo tres circunstancias. El material a secar no puede ser expuesto a gases de combustión. Puede ocasionar un arrastre de material particulado elevado. Existe una fuente de vapor a baja o media presión. La transferencia de calor se da por conducción. La eficiencia térmica de este tipo de secadores es alta (75 – 90 %), sin embargo el costo de capital es alto, debido a los tubos, los sellos, y otros componentes. Lo cual se puede compensar por el menor costo de limpieza del flujo de gas de salida [28].

Secador de Vacío Rotatorio

El secador rotatorio, o de doble cono (ver Figura 8), es básicamente un contenedor giratorio que contiene el material a secar. Este tipo de secadores es ampliamente usado para secar materiales como: materiales libres de polvo, gránulos y cristales. Debido a lo ligero del movimiento, este tipo de secadores no es adecuado para trabajar materiales pegajosos. El trabajo en vacío es usado con materiales sensibles a altas temperaturas, fácilmente oxidables y propensos a combustión o explosión [33].

Otros Tipos de Secadores Indirectos

Aunque no son muy comunes, es posible usar vapor sobrecalentado a alta presión como medio de secado para ciertos secadores. En este tipo de secadores, el movimiento relativo entre la superficie caliente y el material a ser secado ayuda a incrementar la tasa de transferencia de calor y masa [33].

Tabla 1. Usos de los diferentes tipos de secadores de biomasa. Adaptada de [22].

Tipo de secador	Medio de secado típico	Temperaturas de secado reportadas	Tasas de evaporación reportadas	Consumos de calor y electricidad reportados	Ventajas	Desventajas
Secador de tambor	Gas de combustión	200 – 600 °C	3,6 – 20 t/h	Calor 3,5 – 4,2 MJ/kg	Combustibles con tamaños de partícula heterogéneo Robusto Bajos costos de mantenimiento.	Problemas de suciedad y olores. Cortezas grandes pueden causar obstrucción Riesgo de incendio después del secado y al apagar.
Secadores de Banda transportadora	Aire	30 – 150 °C	0,5 – 50 t/h		Combustibles con tamaños de partícula heterogéneo Adecuado para bajas temperaturas y tiempos de residencias prolongados Robusto Buena controlabilidad.	Secadores de gran dimensión. Riesgo de fuego dentro del secador.
Secadores de cascada	Gases de combustión	160 – 280 °C	0,8 – 7 t/h	Calor 5,8 MJ/kg. Electricidad 10-15kWh/t	Apropiado para combustibles con tamaños de partícula heterogénea. Dimensiones razonables del secador. Robusto en la mayoría de casos.	Corrosión y erosión Riesgo de fuego después de secado y en el cierre
Secadores Neumáticos	Gases de Combustión Vapor	Para secadores gases de combustión 150 – 700 °C. Para secadores de vapor la temperatura depende de la presión y grado de sobrecalentamiento $T > 150$ °C	Secador de gas de combustión 10 – 26 t/h. Secadores de Vapor 6 – 30t/h	Calor (Gas de combustión) 3,7 MJ/kg Electricidad (Gas de combustión) 60 – 120 kWh/t (en molinos de secado material particulado 25 – 40 kWh/t) Calor (vapor) 400 – 1000 kJ/kg _{agua} cuando el calor generado es recuperado.	Secador de tamaño reducido Construcciones robustas El consumo de calor es menor para el secador de vapor en el caso que el calor generado sea recuperado.	No es adecuada para partículas grandes. Problemas de corrosión y erosión. Riesgos de fuego después del secado y en el cierre. Fugas y combustible a la entrada y la salida pueden causar problemas en el vapor de secado.

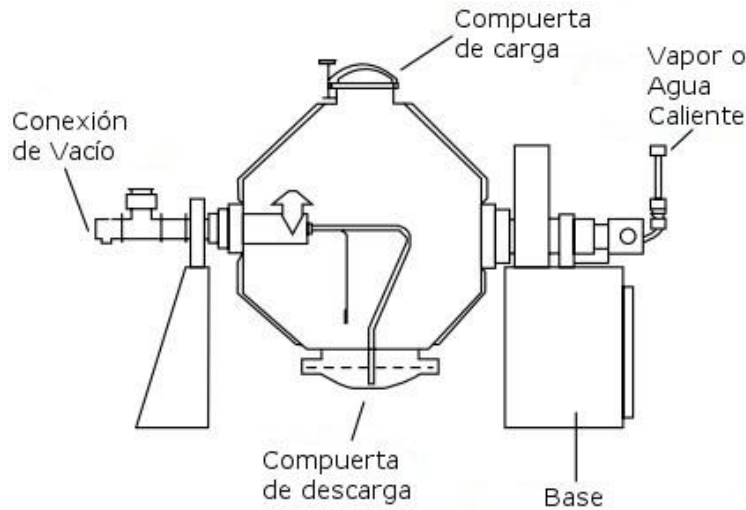


Figura 8. Secador de vacío rotativo. Modificado de [33].

2.7.3 Secadores Directos

Los secadores directos, son el tipo más usado de secador en el sector industrial. En este tipo de secadores el medio de secado (aire, gases de combustión, vapor) entra en contacto directo con el material a secar. Dentro de los secadores directos se encuentran los secadores rotativos, de banda, de bandeja, etc. [33].

2.7.4 Secadores Rotativos

Los secadores rotativos se clasifican en: directo, indirecto – directo, indirecto y tipos especiales. Éste forma de clasificación depende de la forma de transferencia de calor. Es directo si la transferencia de calor se presenta mediante contacto del medio de secado con el producto. Y es indirecto cuando el medio de secado está separado del producto por paredes sólidas [33]. Los principales tipos de secadores rotativos son:

Horno Rotatorio Directo

Este tipo de secador, consiste en un cilindro metálico revestido en el interior con un bloque aislante, o un ladrillo refractario. Esto se hace con el fin de trabajar altas temperaturas [33].

Secador Indirecto de Vapor

Este secador consiste en una carcasa cilíndrica metálica desnuda, con una o más filas de tubos metálicos ubicados longitudinalmente en el interior. Es adecuado en lugares donde está disponible un flujo de vapor, o en procesos en los cuales se requiera el enfriamiento de vapor [33].

Horno calcinador rotatorio indirecto

Este consiste en un cilindro metálico rodeado por un horno eléctrico o de combustión. Es adecuado para trabajar a altas temperaturas, limitadas únicamente por la resistencia del material de construcción 800 – 1025 K para acero inoxidable y 650 – 700 K para aceros al carbono [33].

Secador directo roto-louver

Este es quizás el más importante de los secadores especiales. En él, el material avanza en contracorriente con el flujo de secado y es adecuado para temperaturas medias y bajas [33].

Secador Rotatorio directo

El secador directo rotativo es muy usado en la industria, en una amplia gama de materiales. Esto debido a sus ventajas económicas cuando se usa aire o gases de combustión como medio de secado. Adicional a esto, existen reglas empíricas bien establecidas para el diseño, por lo que es percibido como una elección de bajo riesgo [28].

Consiste en una carcasa cilíndrica rotando sobre rodamientos y usualmente inclinados respecto de la horizontal, ver Figura 9 [33]. Esta configuración de secador maneja normalmente una relación longitud – diámetro entre 4 y 10 y una velocidad de rotación de 1 a 10 r.p.m. El material es cargado en el extremo superior, atraviesa la carcasa u es descargado en la parte inferior. El medio de secado puede ser introducido bien por la parte superior o bien por la parte inferior [28].

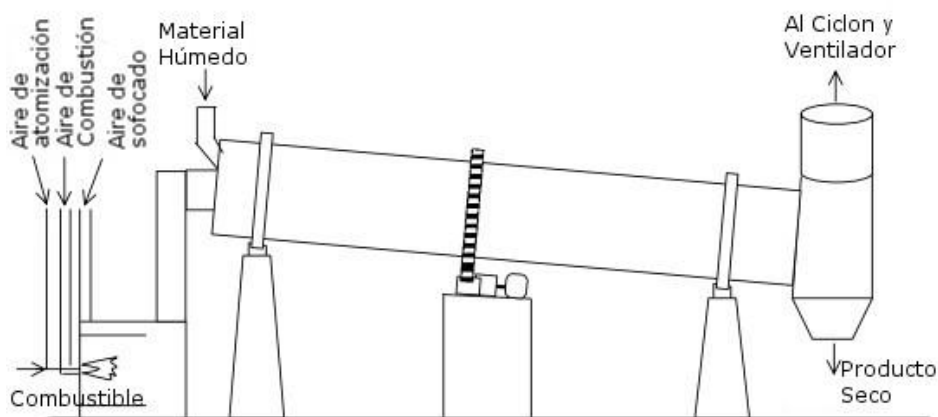


Figura 9. Secador rotativo. Modificado de [33].

Secador Rotativo de Persiana

El secador rotativo de persiana puede ser pensado como un secador directo, sin embargo a diferencia de estos, el flujo se da en circulación directa. El secador

consta de un cilindro inclinado levemente respecto de la horizontal. En la parte interior tiene una gran cantidad de canales longitudinales cada una con una persiana tangencial con bisagras (Figura 10) [28]. Una de las principales ventajas de este secador es que la transferencia de calor es eficiente. Por otra parte el tamaño es considerablemente inferior que un secador equivalente de cascada. Sin embargo en contraste, tiene gran complejidad en la construcción, así como grandes caídas de presión, por lo que requiere ventiladores de gran tamaño [28].

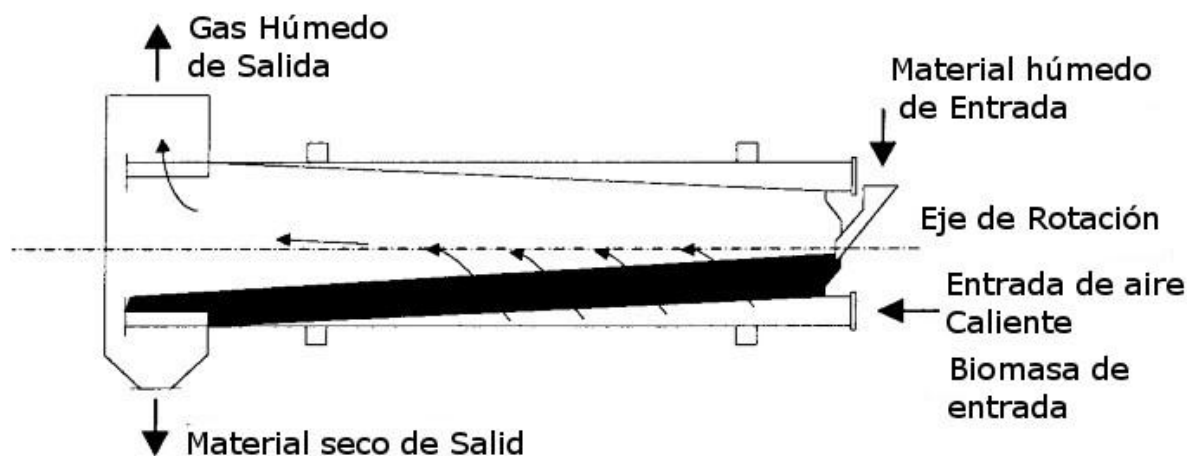


Figura 10. Secador rotativo de persiana. Modificado de [28].

2.7.5 Secadores de Lecho Fluidizado

Los secadores de lecho fluidizado son ampliamente usados en el secado de partículas húmedas que pueden ser fluidizadas. También son adecuados para el secado de lechadas, pastas que pueden ser fluidizadas en lechos de sólidos inertes. Dentro de las principales ventajas de esta tecnología se encuentran: tasa alta de remoción de humedad, alta eficiencia energética, fácil transporte del material dentro del secador, fácil de controlar y bajo costo de mantenimiento. Dentro de las principales limitaciones se cuenta: altas caídas de presión, Alto consumo de energía eléctrica, baja calidad de la fluidización en algunos materiales, calidad del producto no uniforme para ciertos tipos de lechos fluidizados, erosión en ductos y contenedores entre otras [33].

La principal característica de este tipo de secadores es la existencia de un sistema de distribución que garantiza una velocidad uniforme alrededor del colchón de secado. El aire que sale de la cámara de secado usualmente es alimentado a un ciclón para separar partículas finas, las cuales son adicionadas al producto o aglomerado. Por encima del distribuidor, bandejas perforadas un colchón de alimento particulado por encima de 15 cm de profundidad. Aire caliente es introducido a través del lecho ocasionando que las partículas lleguen a estar suspendidas y vigorosamente agitadas [2].

2.7.6 Secadores de Tambor

Los secadores de tambor, son dispositivos usados principalmente en el secado de materiales viscosos, soluciones concentradas, lechadas o pastas dentro de tambores rotatorios. Son secadores de funcionamiento continuo que constan de una carcasa cilíndrica que gira sobre unos soportes adecuados. La longitud del cilindro varía entre 4 y 10 veces el diámetro, cuyos valores oscila entre 0,3 y 3 m [33].

Secador Atmosférico de doble Tambor

Este tipo de secadores tiene una mayor producción, puede manejar un amplio rango de productos y es más eficiente (Figura 11). En este tipo de secador la lechada o pasta es alimentada a través una boquilla pendular, o a través de un cabezote con múltiple boquillas [33].

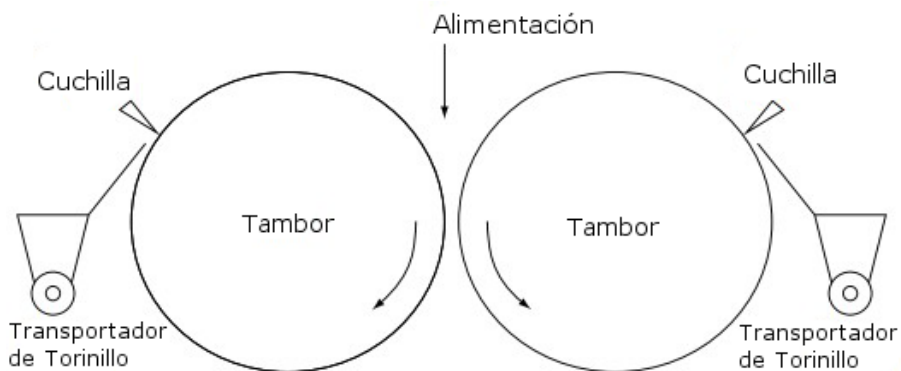


Figura 11. Secador Atmosférico de doble Tambor. Modificado de [33].

Secadores Rotativos de Vacío de Doble Tambor

Materiales sensitivos al calor pueden ser secados en este tipo de secadores. El material a procesar está encerrado bajo una condición de vacío. Este tipo de secadores esta también equipado con un condensador, un cepillo y una bomba de vacío. El funcionamiento es similar al secador atmosférico, con la excepción que posee dos compuertas, una para romper el vacío y otra para la descarga del producto [33].

2.7.7 Secadores de Gases de Combustión

Los secadores de tambor rotativo han sido ampliamente usados en el tratamiento de biocombustibles. Los materiales más frecuentemente usados son aserrín y bagazo. En el secador los flujos de biomasa y medio de secado se desplazan en paralelo. Los gases de combustión a alta temperatura están en contacto con el material húmedo, reduciendo los riegos de fuego y la emisión de componentes orgánicos. Los equipos ensamblados cuentan con diámetros superiores a 4,5 m y

longitudes mayores de 10m, trabajan a velocidades de entre 2 y 8 rpm. Este tipo de secadores está provisto de aletas internas en la carcasa interna que permite dispersar la biomasa en el flujo de aire de secado. Los secadores de cascada han sido usados extensivamente, en especial en países Nórdicos. En este tipo de secador, la biomasa es alimentada con el gas de secado a alta velocidad. En la cámara de secado el gas genera un remolino alrededor de la cama de secado [22].

2.7.8 Secadores Tipo Horno

Estos son secadores de dos niveles, en el cual la cámara de secado con un piso perforado es posicionada encima de un horno. Aire caliente y los productos de la combustión del horno pasan a través del producto a secar. El cual forma lechos mayores a 20 cm de profundidad. Este tipo de secadores tienen poco control sobre las condiciones de secado, además los tiempos de secado son relativamente largos. También tiene altos costos de mano de obra por la necesidad de girar el producto regularmente, y por la carga y la descarga que se lleva a cabo en forma manual [33].

2.7.9 Secadores Solares

El secado solar es implementado desde tiempos inmemoriales para la preservación de productos agrícolas. Esto fue hecho particularmente por secadores solares abiertos [34]. Ahora bien, este tipo de tecnología presenta limitaciones de producción a gran escala, baja capacidad de control, posibilidades de degradación del producto, infección por insectos etc. [33] exposición a la lluvia, viento, además de requerir mucha mano de obra y áreas extensas.

Dentro de las principales ventajas de los secadores solares se pueden citar, el uso de una fuente de energía completamente libre de polución, renovable y que no puede ser monopolizada [33]. En cuanto a las desventajas, la principal es la periodicidad de la energía solar, la cual fluctúa a lo largo del día y que hace necesario un sistema de control y almacenamiento de energía eficiente [33].

Secadores Solares Directos

En los secadores solares directos, la radiación solar pasa a través de coberturas transparentes, usualmente vidrio, para incidir en el material a ser secado. La cubierta reduce además las pérdidas de calor por convección, e incrementa la temperatura al interior del secador [35].

Secador Solar de Cabina

Este tipo de secador es una caja caliente, usualmente hecha de madera. Los costados y el fondo de la cámara esta pintadas de negro, con el fin de aumentar la

colección de radiación solar. La cámara esta provista de agujeros de ventilación en el fondo y en la parte superior [35].

Secador Solar por Convección Natural

Este tipo de secador consiste en una placa solar, encargada de calentar el aire. Un ducto flexible de reducción, una cámara de secado y una chimenea, como se observa en la Figura 12. El colector solar consta de un absolvedor con aletas, cubierta de vidrio, aislante y un marco [35].

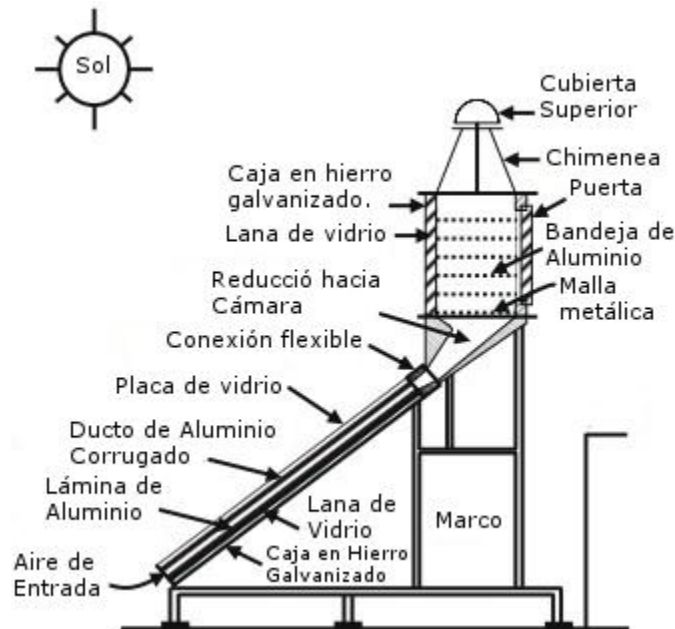


Figura 12. Secador solar por convección natural. Modificado de [35].

2.7.10 Secador en Pila en Flujo Cruzado

Este tipo de secadores es atractivo, debido a la eficiencia en la transferencia de calor y debido a la mínima alteración en el material a ser secado (Figura 13). Este tipo de secadores se presentan normalmente como secadores de bandeja. Dichas bandejas son usualmente posicionadas verticalmente en dos o tres columnas, normalmente dentro de una cabina [28].

Convencionalmente este tipo de secadores consiste en un contenedor o silo, o un simple cuarto con el piso perforado, por el cual el medio del cual atraviesa el medio de secado caliente. Dicho medio de secado es usualmente aire, sin embargo se pueden usar otros medios. El aire puede hacerse circular a través de un plenum o un ventilador eléctrico [28].

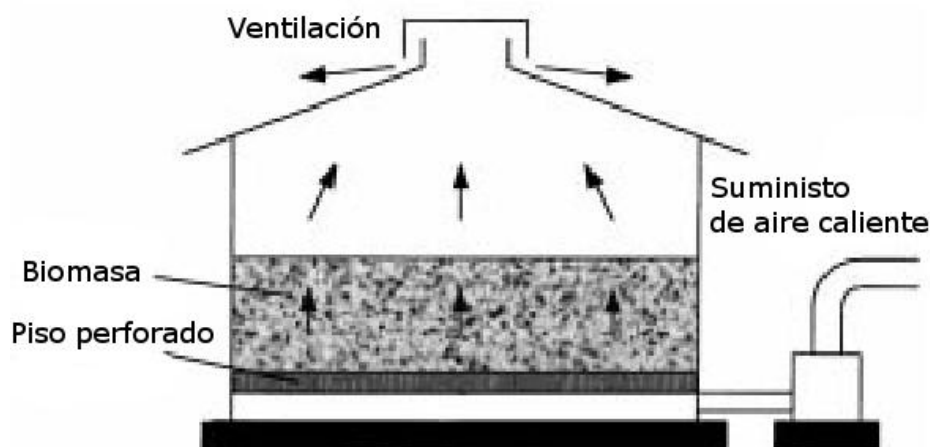


Figura 13. Secador en Pila. Modificado de [28].

2.7.11 Secador Continuo con Circulación del Medio

Este tipo de secadores toma dos configuraciones básicas, siendo por mucho los más usados los secadores de banda. En este tipo de secadores el aire de secado es soplado a través de una capa delgada de material estático soportado en una banda móvil. Por otra parte, son menos conocidos los secadores de persianas de ventilación. En los cuales el material a secar circula por un tubo rotativo formando una cama de secado enrollado, en la cual el medio de secado es suministrado a través persianas en formas anulares [28].

Secadores de Banda

Los secadores de banda operan haciendo pasar el medio de secado verticalmente a través de una capa delgada permeable, la cual se mueve horizontalmente a través de una cámara de secado sellada. El flujo de gas puede ser hacia arriba o hacia abajo. Existen dos configuraciones de este tipo de secadores. En los secadores de una etapa y un paso de aire una banda corre la longitud completa del secador (Figura 14). Por otra parte en los secadores de múltiples etapas con un paso, las bandas son organizadas en serie, en la cual la descarga de una banda se da en el inicio de la siguiente (Figura 15). Con lo cual se obtiene además el cambio de la superficie en contacto con el medio de secado. En los diseños de múltiples pasos un número de bandas es instalado uno sobre otra, de tal forma que cada banda descarga en la banda que se encuentra debajo (Figura 16) [28].

Para cada caso, el medio de secado usado habitualmente es aire, gases de combustión o una mezcla de ellos, y es impulsado a través de secador mediante ventiladores. Una de las principales ventajas de esta tecnología de secado es el control de temperatura, particularmente importante en el secado de materiales sensibles. Adicional a esto, el tiempo de residencia se puede regular simplemente variando la velocidad de avance de banda [28].

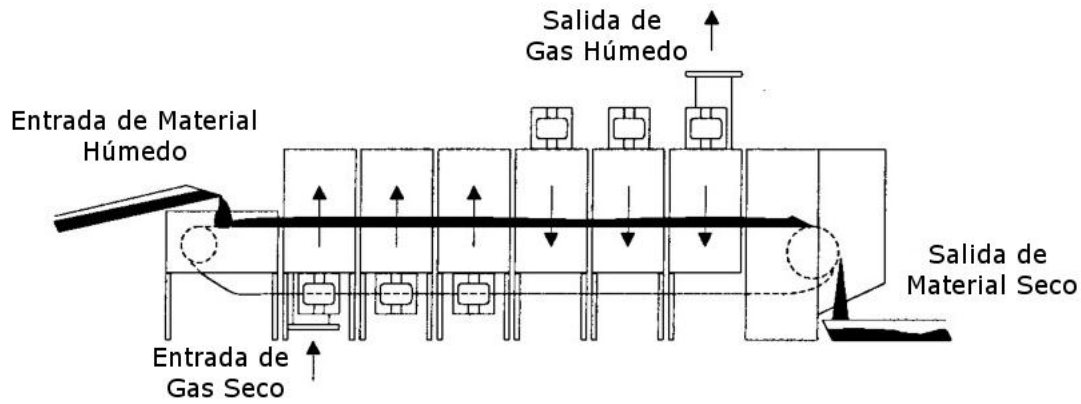


Figura 14. Secador de una etapa y un paso. Modificado de [28].

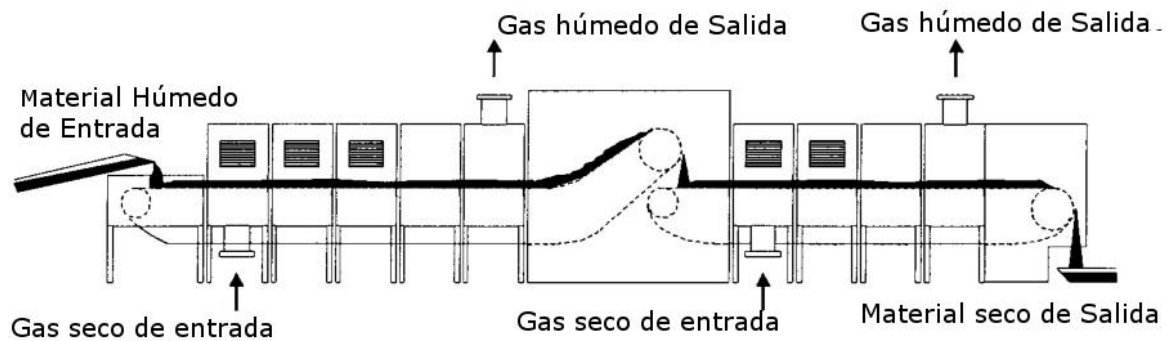


Figura 15. Secador de múltiples etapas y único paso. Modificado de [28].

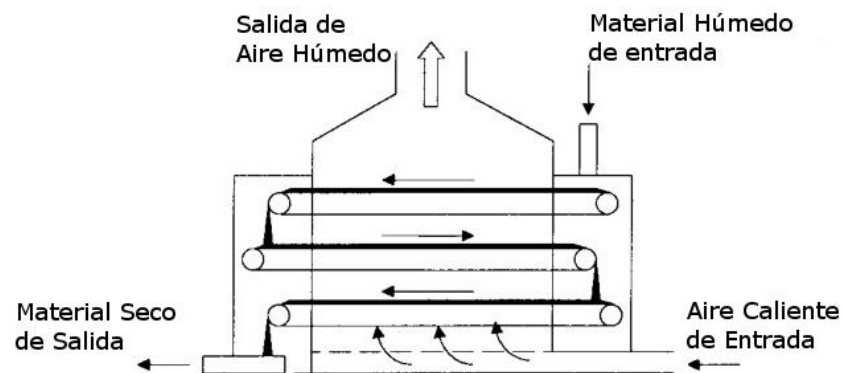


Figura 16. Secadora de múltiples pasos. Modificado de [28].

2.7.12 Nuevas Tecnologías de Secado

Debido a la creciente importancia que tiene el secado dentro de la canasta energética de un país, a la variabilidad de los precios de los combustibles y a la necesidad de productos de mayor calidad, se han desarrollado avances significativos en nuevas tecnologías de secado [12].

Secadores de Vapor

Los secadores de vapor sobrecalentado son interesantes, debido a que el consumo de energía puede reducirse si el vapor es recuperado para otros procesos. Adicional a esto, se reducen los gastos de limpieza, dado que los materiales contaminantes son concentrados en los condensados. Por otra parte, los compuestos orgánicos valiosos pueden ser recuperados del mismo modo. No posee oxígeno por lo que no se presentan reacciones de oxidación, combustión y explosión [12].

Secador por Lotes Intermitente

Si bien esta tecnología no es radicalmente nueva, si busca hacer un uso energético más eficiente durante el proceso de secado. Para ello modificar las condiciones dentro de la cámara de secado. Existen dos formas de aplicar el secado intermitente [12].

El primero consiste en variar el flujo de medio de secado, variando la presión al interior de la cámara. El secado intermitente se divide en dos etapas de secado separadas. Éstas se llaman, secado activo, y secado no activo. Durante el secado activo, el calor es aplicado sobre la muestra. Mientras que durante el periodo no activo, la aplicación de calor se suspende. Estudios experimentales muestran que el uso de este tipo de secadores puede reducir el consumo de energía en un 68%. El segundo tipo de secador intermitente consiste en aplicar variaciones en las condiciones de secado progresivamente. Esto con el fin de disminuir el consumo de energía [12].

Por último, en la Tabla 2 se presenta un resumen de las características principales de los secadores presentadas por Brammer et al. [28].

2.8 Estudios Experimentales del Secado

Existe en la literatura una amplia variedad de desarrollos experimentales encaminados a estudiar la cinética del proceso de secado. Adicional a esto, otro factor ampliamente estudiado, es la influencia del proceso de secado en las propiedades finales del producto.

2.8.1 Secado de Arcilla

Chemkhi et al. [36] desarrollaron un modelo experimental de secado de arcilla en túnel convectivo. El secador está formado por cuatro secciones básicas: sección de control de aire, sección de control de calentamiento, sección de humidificación y cámara de secado. El aire se hace circular a través de un ventilador centrífugo. El flujo de aire se regula ajustando la frecuencia del modulador que controla la velocidad rotacional del motor. El aire fue calentado haciéndolo circular a través de un calentador eléctrico. El proceso de humidificado se lleva a cabo agregando

gotas de agua caliente dentro de la cámara de humidificación. La tasa con la que el agua es adicionada es controlada por una válvula de compuerta. La cámara de secado cuenta con una puerta de vaivén que permite depositar y extraer el material de prueba [36]. Dentro de las principales suposiciones se concluye que existe una marcada influencia de la temperatura y la humedad de la muestra en la difusividad de la arcilla.

Tabla 2. Principales características de los secadores. Modificado de [28].

Categoría de secador	Tipo de secador	Comentarios
Secador por lotes	Silo con piso perforado	Bajo costo, usa fuentes de energía de baja temperatura, presenta grandes variaciones en la humedad final, extensión del secado limitada, secado por lotes, Atractivo en pequeñas escalas.
Secador continuo	Banda	Fácilmente controlable, puede usar una fuente indirecta interna de calentamiento con lo que se consiguen emisiones de moderadas a bajas. Es más adecuado para materiales frágiles
	Rotativo de Persiana	Altas tasas de transferencia de calor, mayor rendimiento específico que los secadores rotativos de cascada pero más costosos, adecuado para materiales frágiles
Rotativo directo	Rotativo de cascada	Usa grandes cantidades de medio de secado, razonablemente económico, es usado en mediana y baja escala con bajo riesgo de selección.
Rotativo indirecto	Rotativo de vapor	Más costosos que los secadores rotativos de cascada, menores emisiones, más adecuado para materiales que no pueden ser expuestos directamente a gases calientes.
Lecho Fluido	Convencional un paso	Bajo costo, transferencia de calor eficiente, sin embargo puede presentar inestabilidad de lecho, sólo es adecuado para tamaños promedio relativamente pequeños y un estrecho rango de tamaños.
Transporte neumático	Vapor presurizado reciclado	Está diseñado para plantas integradas de biomasa, es costoso pero puede resultar adecuado para grandes escalas si es posible recuperar energía. Presenta muy bajas emisiones.

El experimento fue llevado a cabo para determinar el efecto de las variables del proceso en las características de secado de la arcilla. Para ello se consideraron la temperatura de bulbo húmedo y la humedad absoluta del aire. En el proceso de secado las dimensiones de la muestra son: longitud 15 cm, ancho 12 cm y grosor 1,5 cm. Dos grupos de experimentos de secado fueron desarrollados usando diferentes temperaturas y humedades del aire. La velocidad del aire permaneció constante e igual a 2m/s [36].

Grupo 1: Las corridas experimentales se desarrollaron a diferentes temperaturas del aire (40, 50 y 60 °C) con humedad fija en 40%.

Grupo 2: Las corridas experimentales se desarrollaron variando la humedad del aire (30, 40 y 60 %) manteniendo fija la temperatura del aire.

Las curvas de secado fueron determinadas a través de mediciones de la masa pérdida en la muestra durante el secado, bajo condiciones bien definidas de funcionamiento [36].

2.8.2 Secado de Subproductos Agrícolas

Por su parte Montero et al. [37] desarrollaron una unidad experimental, que permite determinar la eficiencia del proceso de secado solar de diferentes subproductos agrícolas. La unidad experimental consta principalmente de una placa colectora plana, una cámara de secado, una chimenea de acero galvanizado conectada a la cámara de secado para mejorar la eficiencia en modo pasivo, y un sistema de calentamiento adicional, tal como se muestra en la Figura 17.

El sistema tiene dos modos de operación. Modo activo, generando convección forzada con un ventilador, y modo pasivo en el cual el movimiento del aire se da por variación en la densidad debido a las diferencias de temperatura en diferentes puntos del equipo. Se realizó inicialmente una prueba sobre el equipo sin carga, con el fin de establecer las estrategias de operación que optimicen el proceso. A través de esta prueba, se busca caracterizar el comportamiento del colector y de la cámara de secado. En las pruebas efectuadas con carga, se realizaron variaciones sobre diferentes parámetros de secado como son, temperatura, humedad relativa y flujo de aire. En el test llevado a cabo, el colector solar plano tenía una inclinación de 20° con la horizontal [37].

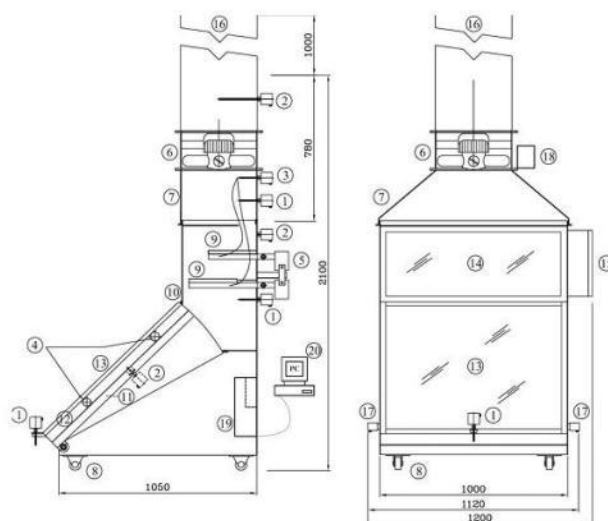


Figura 17. Esquema de secador solar, modificado de [37].

Del trabajo de Montero et al. [37] se observa la reducción del tiempo de secado en un 50% con el uso del secador combinado.

2.8.3 Secado de Papa y Zanahoria

Srikiatden et al. [38] desarrollaron un modelo experimental que les permitió determinar los perfiles de temperatura y humedad de muestras de papa y zanahoria. Los ensayos se llevaron a cabo sobre geometrías cilíndricas, y la humedad inicial fue determinada en un horno de vacío. Las muestras usadas en el estudio experimental fueron selladas en los extremos con el fin de promover una pérdida de humedad unidimensional.

Los perfiles de temperatura y humedad de las muestras de papa y zanahoria de 1,4 cm de diámetro y de papa de 2,8 cm de diámetro fueron medidos durante un proceso de secado convectivo con aire caliente a 70°C y 1,5 m/s. Las muestras fueron removidas del secador con intervalos de 30 minutos durante el secado y puestas inmediatamente en nitrógeno líquido para evitar pérdidas de humedad y cambios en la distribución de la misma. Las muestras son puestas entonces en una maleta de almacenamiento en frío y colocadas en un refrigerador a -4 °C por al menos 8 h. Cortadores cilíndricos fueron usados para obtener dos capas concéntricas de las muestras de papa y zanahoria de 1,4 cm, y cuatro de la muestra de papa de 2,8cm. Estas muestras fueron puestas en un horno de vacío para determinar la humedad. Este procedimiento fue repetido periódicamente en intervalos de tiempo para obtener la concentración de humedad de la muestra. El perfil de temperaturas se obtuvo ubicando las termocupas tal como se muestra en la Figura 18 [38]. En los resultados presentados por Srikiatden se puede observar que las curvas de secado son uniformes al inicio del proceso, seguidas por curvas parabólicas, los cuales son características del proceso de secado difusivo.

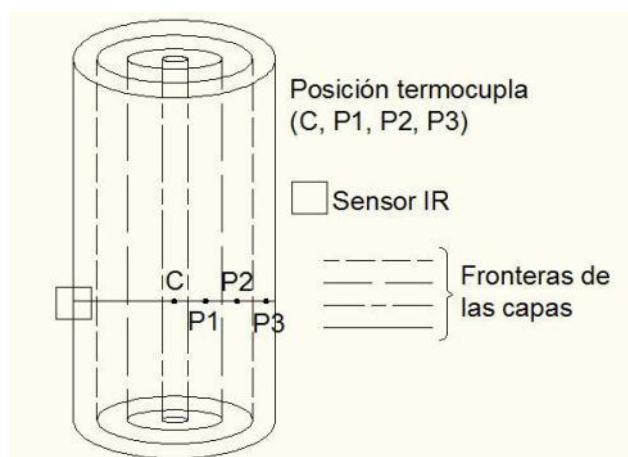


Figura 18. Distribución de termocupas. Modificado de [38].

Barati y Esfahani [39] también estudiaron experimentalmente el secado de zanahoria. Para ello tomaron láminas de zanahoria de 54 mm de longitud y 3 mm de espesor. Las condiciones iniciales de la muestra fueron temperatura 60 °C y

contenido de humedad 65%. Las condiciones del medio de secado se asumieron constantes e iguales a 60°C y 45% HR.

Khraisheh et al. [40] desarrollaron un estudio de secado de papa. Las investigaciones fueron llevadas a cabo con una velocidad de 1, 1,5 y 2 ms^{-1} . Para ello usaron rebanadas cilíndricas de papa de 3,5mm de espesor y 26mm de diámetro. La medición de la velocidad se llevó a cabo en tres puntos de la cámara con el fin de obtener una velocidad promedio, la cual es de 1,5 ms^{-1} . Se usaron dos temperaturas para el estudio del secado 40 y 50°C. Para estudiar la influencia de la temperatura en la cinética de secado, se usó una velocidad constante y se varió la temperatura entre 30 y 60°C. También se estudió la influencia de la geometría variando el espesor y el diámetro de la rebanada, manteniendo la temperatura y la velocidad del aire constante en 50°C y 1,5 ms^{-1} .

2.8.4 Secado de Biomasa en Pila

Aunque los sistemas de secado continuos son más usados en la industria, estos no son prácticos a la hora de procesar productos que requieran tiempos de residencia prolongados. Este tipo de productos requiere el uso de secadores por lotes. En la Figura 19 se muestran esquemáticamente los dos sistemas de secado [41].

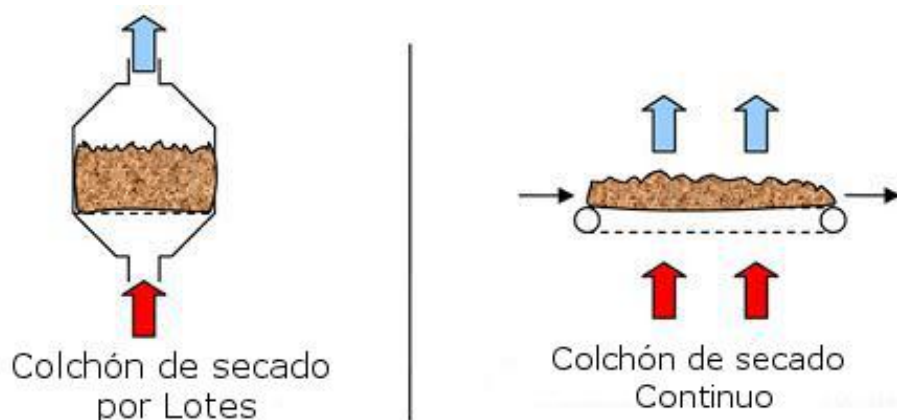


Figura 19. Comparación de sistemas de secado.
a. Secado en pila. b. Secado continuo. Modificado de [41].

El proceso de secado en pila consiste en apilar el material a ser tratado, como se observa en la Figura 19 a. Sin embargo, como es de esperarse, la cinética de secado difiere de los procesos de secado en capa delgada. En la Figura 20 se pueden observar los perfiles de humedad relativa del aire, contenido de humedad y temperatura en el colchón. En esta figura se puede observar tres (3) regiones claramente marcadas. La primera zona, en contacto con el fluido de secado alcanza rápidamente el punto de equilibrio con el mismo. Por tanto, es por tanto, en la zona intermedia donde se presentan los gradientes marcados tanto de humedad como de temperatura [41]. Con sus estudios Lerman et al. [41]

determinaron la humedad final de varios tipos de biomasa bajo diferentes condiciones de secado.

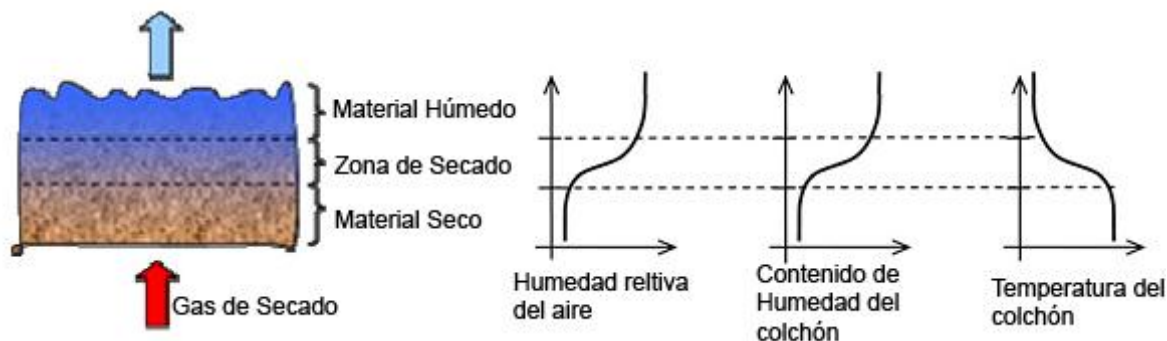


Figura 20. Zonas identificadas dentro de la región de secado. Modificado de [41].

2.8.5 Secado de Bagazo

Mazutti et al. [42] llevaron a cabo pruebas experimentales de secado de bagazo de caña tratado superficialmente, comparándolas con bagazo no tratado. Para ello recurrieron a un secador de escala de laboratorio. El secador consiste básicamente de tres unidades. Un ventilador que provee el aire deseado. Un sistema de calentamiento de 3kW y un sistema de control. El material a secar es esparcido en capa delgada en una bandeja de aluminio. El experimento se llevó a cabo bajo cuatro condiciones de temperatura. 30, 35, 40 y 45°C con un flujo volumétrico de 2,0 y 3,0 m³h⁻¹. El espesor de la capa fue de aproximadamente 10mm. Para medir el peso durante el secado, la muestra fue retirada de la cámara de secado y pesada en una balanza. Se observó que el tratamiento superficial tiene una marcada influencia sobre el secado del bagazo al presentar mayor velocidad de secado que el bagazo no tratado.

Adicional a esto Sosa – Arnao et al. [43] realizaron una revisión completa de estudios experimentales de secado de bagazo de caña. En dicha revisión se presentan diversas tecnologías de secado, así como los resultados (humedad final promedio en la muestra). Dentro de los trabajos citados por Arnao se destacan el desarrollado por Correira quien reporto un aumento en la generación de vapor mediante reducción de la humedad de 52 a 40% b.h. baso en el uso de secadores neumáticos. Salermo et al. Desarrollaron compuesto por un lecho fluido, un ducto neumático y un ciclón. El sistema trabaja con una tasa de 10 t/h y reduce la humedad del bagazo de 47 a 35 % b.h.

El primer estudio de secado de bagazo fue desarrollado por Kerr en 1910. El secador fue construido en acero de 1,2 x 1,8m de sección transversal y 6m de altura. Trabajaba a contracorriente, y permitía reducir la humedad del bagazo de caña de 54,3 a 46,4% en b.h. [43].

2.8.6 Bio-secado de Residuos Uva

Rada et al. [27] desarrollar un estudio del bio-secado de diferentes biomásas. La primera son residuos de uva, la segunda es una mezcla de lodos de aguas residuales y desechos sólidos municipales. La última corresponde a desechos sólidos municipales. Para ello desarrollaron una planta piloto de 1m^3 . Dicha planta piloto cuenta con una caja adiabática soportada en una balanza electrónica con el fin de monitorear el proceso de secado. Las imágenes del secador prototipo pueden ser observadas en la Figura 21.



Figura 21. Planta piloto de bio-secado. Tomado de [27].

Los investigadores presentaron la relación existente entre las emisiones humedad, del material volátil y material no volátil. De tal forma que se relacionan la composición del material a ser secado antes y después se presentan como se muestra en la Figura 22. Como principal resultado se tiene haber incrementado el poder calorífico de los desechos de uva en un 38%.

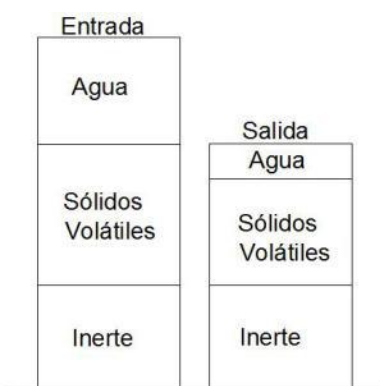


Figura 22. Composición de la biomasa antes y después del secado. Modificado de [27].

Wang et al. [75] desarrollaron un estudio experimental mediante secado de manzana, el cual funciona en el rango de temperaturas de 20 a 120°C . La unidad está compuesta por un calentador y su unidad de control, un ventilador eléctrico, sensores, ductos y cámara de secado.

2.9 Modelamiento Matemático

Si bien el secado térmico de productos ha atraído esfuerzos significativos de Investigación y Desarrollo, debido principalmente a que este es el proceso más intensivo energéticamente de la poscosecha [12] además de ser pre-proceso vital previo a procesos industriales en varias industrias. El modelamiento matemático, no es algo trivial, y aún no existe una teoría de secado universal o ampliamente aplicable. En vez de ello existen diversos modelos aplicables a una combinación producto – equipo específico – condiciones de secado [44],[10]. Una de las principales dificultades para desarrollar modelos efectivos, radica en la complejidad del material biológico, el cual presenta diferentes reacciones de tipo químico y biológico difícil de predecir, así como la variabilidad de las propiedades a lo largo del proceso de secado. Entre las más importantes se destaca la presencia de poros [45]. En la presente sección se muestran algunos de los modelos existentes en la literatura, con el fin de evidenciar la complejidad de modelación del proceso de secado de material biológico.

Un medio poroso hace referencia a sólidos que tienen espacios vacíos (poros), los cuales se encuentran llenos de fluido (gas o líquido). Dichos poros, se pueden clasificar de dos formas. Según su tamaño en materiales porosos (diámetros más grande de 10^{-7} m) y capilar-porosos (diámetro de poro menor a 10^{-7} m) [45]. Y según su estructura poros ciegos, poros cerrados y poros de flujo total, como se observa en la Figura 23 [46].

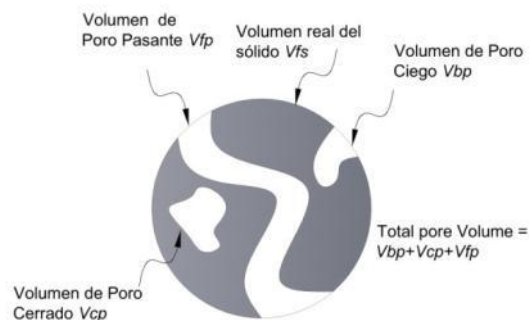


Figura 23. Clasificación de los poros. Modificado de [46].

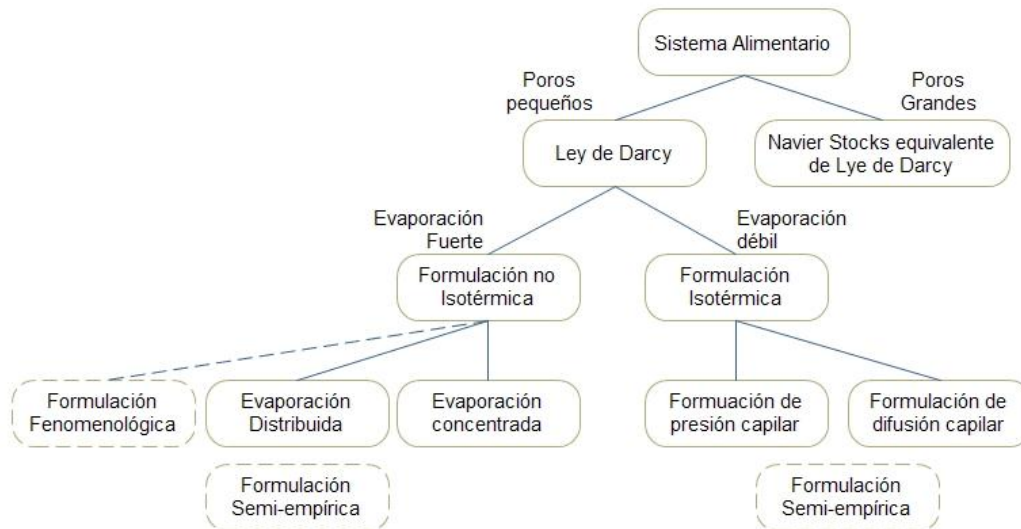


Figura 24. Clasificación de modelos SHMT¹ en medio poroso. Modificado de [45].

Adicional a esto, Datta presentó un listado de los procesos aplicados sobre alimentos dependiendo del tipo de poro presente en el mismo, el cual se resume en la Tabla 3 [45].

Tabla 3. Clases de poros y su relación con procesos en alimentos [45].

Características del medio poroso	Aplicación a alimentos
Poros grandes, presión aplicada	Enfriamiento de productos como papa o fresas
Poros pequeños, presión debida principalmente a evaporación interna	La mayoría de los procesos que involucran incrementos significativos de la temperatura, como secado, fritado, calentamiento por microondas.
Poros pequeños, sólo capilares, evaporación interna no significativa.	Baja temperatura cuando el calentamiento no es intenso, como rehidratación y almacenamiento.
Poros pequeños, capilares más otros modos, pequeñas cantidades de evaporación.	Baja temperatura cuando el calentamiento no es intenso, como rehidratación y almacenamiento.

2.9.1 Formulación de Sistemas con Poros Grandes

Algunos ejemplos de la formulación con poros grandes, es el estudio de enfriamiento en pila de productos esféricos, como papa, raíces de achicoria, peras, etc. Para su estudio, normalmente se usa la ecuación planteada por Navier – Stokes, análoga a la Ley de Darcy, ver (2-1) [45].

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla P - \frac{\mu}{k} u - \frac{c}{k^{1/2}} \rho |u| u + \frac{\mu_{eff}}{\phi} \nabla^2 u \quad (2-1)$$

¹ Transferencia simultánea de calor y masa (SHMT) por su sigla en inglés.

2.9.2 Formulación del Sistema con Poros Pequeños

Este modelo cubre la mayor parte de los procesos en alimentos, como el transporte en tejido animal y vegetal, o estructuras de alimentos. En la Figura 25 se muestran las fases presentes y los mecanismos de transporte asociados a cada una de ellas. Existe una gran variedad de formulaciones de poros pequeños, las cuales se pueden clasificar dependiendo la formulación de la misma en mecánísticos y fenomenológicos [45].

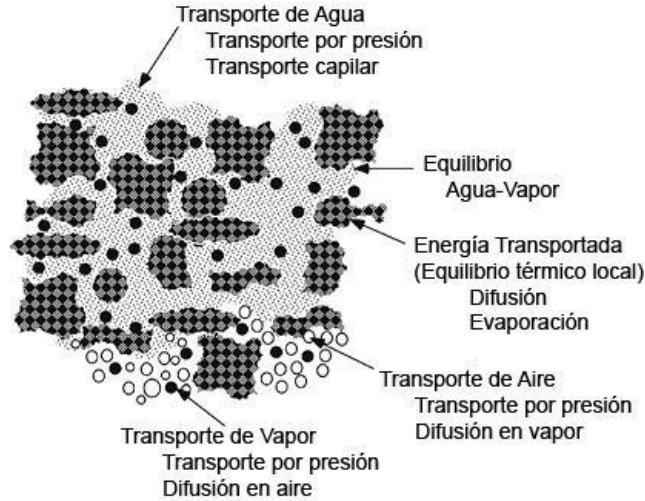


Figura 25. Esquema de un medio poroso no saturado. Modificado de [45].

Modelos Fenomenológicos

Uno de los modelos fenomenológicos más conocidos es el planteado por Luikov, el cual ha sido empleado en varios trabajos [45],[47],[48],[49]. En dicho modelo las ecuaciones macroscópicas de transferencia de calor y masa están basadas en el modelo fenomenológico de la termodinámica del no-equilibrio. Para ello se seleccionan la temperatura, el contenido de humedad y la presión del gas como variables primarias, relacionándolas a través de tres ecuaciones,

$$C_q \frac{\partial T}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 T + K_{12} \nabla^2 M_a + K_{13} \nabla^2 P \quad (2-2)$$

$$C_m \frac{\partial M_a}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 T + K_{22} \nabla^2 M_a + K_{23} \nabla^2 P \quad (2-3)$$

$$C_p \frac{\partial P}{\partial t} = K_{31} \nabla^2 T + K_{32} \nabla^2 M_a + K_{33} \nabla^2 P \quad (2-4)$$

Este modelo incluye el flujo convectivo del gas así como el flujo capilar del líquido, y conlleva a un sistema de tres ecuaciones paralelas. Esta formulación es favorable a la hora de encontrar una solución analítica de la misma. Sin embargo, el modelo tiene algunas desventajas. La principal es que la interpretación de los

parámetros físicos no es clara, lo anterior debido a que las expresiones de flujo están basadas en relaciones fenomenológicas [45].

Wu et al. [47] modelaron el fenómeno de transferencia de calor y masa durante el secado de mezclas de alimentos. Mientras que Pandey et al. [48] usaron una nueva aproximación para solucionar el sistema de ecuaciones planteado por Luikov. Dicho modelo tiene la particularidad de tener en cuenta las raíces complejas que se generan en la solución. Las relaciones usadas son,

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = (1 + \varepsilon K_o Lu Pn) \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \varepsilon K_o Lu \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} \quad \text{para } (0 < x < 1, \tau > 0) \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = -Lu Pn \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + Lu \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} \quad \text{para } (0 < x < 1, \tau > 0) \quad (2-6)$$

Por su parte Bouddour et al. [49] usan el modelo planteado por Vries y Philip, el cual es aplicado exitosamente para describir el proceso simultáneo de transferencia de calor y masa de amplio rango en medios porosos. Para ello, plantean el siguiente sistema de ecuaciones acopladas,

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot ((\lambda_T + L_v D_{TV}) \nabla T) + \nabla \cdot (L_v D_{\theta V} \nabla \theta_l) \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \nabla \cdot ((D_{TV} + D_{\pi}) \nabla T) + \nabla \cdot ((D_{\theta V} + \theta_l) \nabla \theta_l) \quad (2-8)$$

También Dong [50] desarrolló un estudio de secado de alimentos y material biológico. En este trabajo se consideró que los efectos de la temperatura y la presión son insignificantes, por lo que el modelo es resuelto asumiendo difusividad constante.

Modelos Mecánicos

Data [45], [46] presentó el modelo planteado inicialmente por Whitaker, el cual parte de las ecuaciones de continuidad de calor y masa para cada fase. Este modelo es usado en el estudio de calentamiento convectivo, calentamiento por microondas, cocción y procesos de freído [51]. Si bien el planteamiento del modelo no difiere significativamente del modelo planteado por Luikov, debido a su buen sustento físico y matemático ha tenido buena aceptación en el área de secado [10].

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_v) = \dot{I} \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_w) = -\dot{I} \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_a) = 0 \quad (2-11)$$

$$\left(\rho c_p\right)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{n}_v h_v + \vec{n}_a h_a + \vec{n}_w h_w\right) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T\right) - \lambda \dot{I} + \dot{q} \quad (2-12)$$

Por su parte Bartzanas et al. [52] implementaron dos modelos matemáticos para predecir el secado en el campo de paja. En su trabajo, el modelo de humedad en función del tiempo puede ser determinado a partir de (2-13) y (2-14). Estas expresiones fueron resueltas en forma analítica y numérica respectivamente.

$$q_{i,2} = q_{eq} + \left(q_{i,1} - q_{eq}\right) e^{-\alpha_p E_a(t_2 - t_1)} \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial(U\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (2-14)$$

Por otra parte, Hernández et al. [10] presentan una formulación diferente del modelo presentado por Withaker, el cual es representado a través de,

$$\overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} + \left\{ D_{pl} \left[\nabla p - D_{\sigma s} \left(\frac{\rho_s^*}{\rho_l \varepsilon} \nabla M - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_v^* \right) - D_{\sigma T} \nabla T - \rho_l g_{acc} \right] c_{pl} - D_{pg} (\nabla p) c_{pg} \right\} \cdot \nabla T = \quad (2-15)$$

$$\nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T \right) - L(\dot{m}_l - \dot{m}_b) - h_s \dot{m}_b + s$$

$$\rho_s^* \frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ -D \nabla p - D_{pl} \left[-D_{\sigma s} \left(\frac{\rho_s^*}{\rho_l \varepsilon} \nabla M - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_b^* - \frac{1}{\rho_l \varepsilon} \nabla \rho_v^* \right) \right] - D_{bl} \nabla \rho_b^* - \rho_g D_{va} \nabla \left(\frac{\rho_v^*}{\rho_g} \right) \right\} = 0 \quad (2-16)$$

Formulación de Difusión Capilar

De la misma forma que se realizó la anterior deducción, a cerca de la presión capilar, es posible escribir una ecuación equivalente en términos de la difusión capilar de agua líquida, la cual se asemeja a la ecuación usada para la difusión [45],

$$\left(\frac{\partial c_w}{\partial t} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{k_w \rho_w g}{\mu_w} \nabla h \right) = 0 \quad (2-17)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} - \nabla \cdot (D_w \nabla c_w) = 0 \quad (2-18)$$

Donde D_w es equivalente a la difusividad capilar de agua, dada por,

$$D_w = -\rho_w^2 \frac{k_w}{\mu_w} \frac{\partial h}{\partial c_w} \quad (2-19)$$

2.9.3 Modelos de Difusión Líquida

Ciro et al. [53] Srikiatden et al. [38] y Barati et al. [39], [54] basaron sus estudios sobre el secado para diferentes productos utilizando la segunda Ley de Fick. La cual establece que la velocidad de la transferencia de masa a través de una unidad de área normal a la sección es proporcional al gradiente de concentración medido,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla (D_{eff} \nabla M) \quad (2-20)$$

Por su parte, Barati et al. [39] plantearon el modelo para predecir el secado de tablas en pila. En su trabajo emplearon las siguientes ecuaciones para las transferencias de masa y calor,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2-21)$$

$$\rho \delta C_n \frac{\partial T}{\partial t} = h(T_a - T) - h_{mass} L_w (P_a - P_s) \quad (2-22)$$

Mientras que los mismos autores [55] plantean dichas ecuaciones, pero esta vez para el secado convectivo de cortes rectangulares de zanahoria de la siguiente manera,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (2-23)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-24)$$

Por su parte Ciro-Velásquez et al. [53] formularon un modelo que simula numéricamente el secado de café en capa delgada, para lo cual usaron las expresiones,

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} = \nabla (D_{eff} \nabla M_k) \quad (2-25)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) \quad (2-26)$$

Srikiatden y Roberts [38] implementaron el modelo para predecir la cinética de secado de muestras cilíndricas de papa y zanahoria, usando para ello las ecuaciones que se describen a continuación.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2-27)$$

$$\rho_B c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} k_T \frac{\partial T}{\partial r} + k_T \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \rho_s \lambda_v \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2-28)$$

Es notable que a pesar que los modelos usados se basan en un mismo principio, se evidencian diferencias significativas en el planteamiento de las expresiones que los describen formalmente [38].

Chauhan et al. [56] formularon un modelo matemático para predecir la cinética de secado de 500 kg de cilantro en lecho profundo. Para ello utilizan un sistema combinado de colector solar y de lecho rocoso de almacenamiento de energía. El modelo matemático, resumido por (2-29) - (2-32), parte de las ecuaciones de transferencia de calor y masa, aplicadas a la cámara de secado y al lecho rocoso,

$$\rho_f \varepsilon_{GB} (C_f + C_v \lambda_a) \frac{\partial T_f}{\partial t} + G_{GB} (C_f + C_v \lambda_a) \frac{\partial T_f}{\partial x} = h_{vGR} (T_{GR} - T_f) \quad (2-29)$$

$$\rho_{GR} (C_{GR} + C_w M_{kt}) \frac{dT_{GR}}{dt} + h_{fg} G_{GR} \frac{d\lambda_a}{dx} = h_{vGR} (T_f - T_{GR}) \quad (2-30)$$

$$\frac{d\lambda_a}{dx} = -\frac{\rho_{GR}}{G_{GB}} \frac{dM_{kt}}{dT} \quad (2-31)$$

$$\frac{dM_t}{dt} = -K_d (M_{kt} - M_{ke}) \quad (2-32)$$

Khraisshh et al. [40] Establecieron que durante el proceso de secado se lleva a cabo principalmente durante el periodo de caída. Esto indica que el proceso de transferencia es dominado por la difusión de humedad interna.

$$W = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (2-33)$$

Las condiciones iniciales y de frontera son:

$$\begin{array}{lll} t=0 & 0 < r < L & X = X_o \\ t > 0 & r = 0 & \frac{\partial X}{\partial t} = 0 \\ t > 0 & r = L & X = X_e \end{array}$$

Para cilindros,

$$W = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} \exp \left[\frac{-\beta_n^2 D t}{R_c^2} \right] \quad (2-34)$$

Las condiciones iniciales y de frontera son:

$$t=0 \quad 0 < r < R \quad X = X_o$$

$$\begin{array}{lll}
t > 0 & r = 0 & \frac{\partial X}{\partial t} = 0 \\
t > 0 & r = R_c & X = X_e
\end{array}$$

En ambos casos, para rebanadas y formas cilíndricas. La primera condición de borde significa que la distribución de humedad es uniforme a través de la muestra. La segunda implica que la transferencia de masa es simétrica con respecto al centro de la muestra. La tercera condición muestra que la humedad de la superficie alcanza instantáneamente el equilibrio con el aire del ambiente [40].

2.9.4 Teoría Capilar

La teoría capilar se refiere al movimiento de humedad debido a la atracción molecular entre el líquido y el sólido. Este fenómeno es importante en el caso de sólidos granulares, en los cuales el secado es independiente de la concentración de humedad [10].

$$J_l = -K_H \nabla \Psi_c = K_H \rho_s \nabla M \quad (2-35)$$

2.9.5 Modelo de Condensación – Evaporación

Esta teoría toma en cuenta la difusión simultánea de calor y masa y asume que los poros forman una red continua de espacios incluidos en el sólido. Adicional a esto, se asume que la cantidad de vapor varía en forma lineal con la concentración de vapor y temperatura [10].

$$\gamma \frac{\partial M}{\partial t} = K_v \nabla^2 M_v - \frac{\partial M_v}{\partial t} \quad (2-36)$$

$$\varepsilon \frac{\partial M}{\partial t} = k \nabla^2 T - \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-37)$$

2.9.6 Modelos Conservativos

Chandra y Talukdar [57] y Kaya et al. [58] desarrollaron un modelo para determinar la transferencia de calor y masa de objetos húmedos sujetos a secado convectivo. En esta investigación el punto de partida son las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía. Una característica importante de este modelo es que realiza estudios independientes al interior y al exterior del objeto de estudio. Las ecuaciones para el exterior son,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-38)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2-39)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2-40)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2-41)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2-42)$$

Mientras que las ecuaciones al interior del objeto son,

$$\frac{1}{\alpha_T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2-43)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (2-44)$$

Otro enfoque a los modelos basados en conservación es el planteado por Janjai et al. [59], los cuales desarrollaron un modelo teórico – experimental para modelar el secado de chile, banano y café. En el modelo, se consideran los balances de energía y masa para cada uno de los componentes del sistema; por ejemplo el balance sobre el material quedaría expresado por,

$$m_p \left(C_{pp} + C_{pl} M_{kp} \right) \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_a - T_p) + A_p h_{r,p-c} (T_c - T_p) + D_p A_p \rho_p L_p \frac{dM_{kp}}{dt} + F_p \alpha_p I_t A_c \tau_c \quad (2-45)$$

$$\rho_a V_c \frac{dH}{dt} = A_{in} \rho_a H_{in} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} v_{out} + D_p A_p \rho_p \frac{dM_{kp}}{dt} \quad (2-46)$$

Por su parte Defraeye et al. [60] estudiaron la influencia de los coeficientes de transferencia de calor y masa en el proceso de secado convectivo. Lo anterior es llevado a cabo mediante la formulación de un modelo conjugado basado en las ecuaciones de conservación, aplicado a la fase sólida (matriz sólida) y a la gaseosa (medio de secado). Las expresiones para la transferencia de masa, momento y energía quedan como,

$$\frac{\partial \rho_{i_M}}{\partial t} + \nabla (\rho_{i_M} v_{i_M}) = 0 \quad (2-47)$$

$$\rho_g \frac{\partial}{\partial t} (v_g) + \rho_g v_g \nabla v_g = -\nabla p_e + \mu_g \nabla^2 v_g + \rho_g g_{acc} \quad (2-48)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a h_{ea} + \rho_v h_{ev}) + \nabla \cdot (\rho_a h_{ea} v_a + \rho_a h_{ev} v_v) = -\nabla \cdot (q_g) \quad (2-49)$$

Mientras que las ecuaciones de balance para la matriz sólida son,

$$\frac{\partial W_s}{\partial t} = 0 \quad (2-50)$$

$$h_{el} \frac{\partial w_{PM}}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} + (c_{p,s} w_s + c_{p,l} w_{PM}) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (h_{el} g_l + h_{ev} g_v) = -\nabla \cdot q_{PM} \quad (2-51)$$

Pang y Mujumdar [61] aplicaron modelos de conservación de masa y energía al estudio de secadores de flujo cruzado y rotativo. Para el secador de flujo cruzado se obtienen las siguientes expresiones,

$$u \rho_a \frac{\partial Y}{\partial x} = -\rho_w \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2-52)$$

$$u \rho_g \frac{\partial H_e}{\partial x} = -C_{pw} \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (2-53)$$

$$a_r h (T_g - T_s) = -\Delta H_{mv} \rho_w \frac{\partial X}{\partial t} + c_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (2-54)$$

En este último estudio se puede observar la existencia marcada de dos secciones; la primera de secado constante, y una segunda de caída de secado. Estas pueden ser representadas por líneas rectas con un contenido de humedad crítico de 55%. Por otra parte, el secador rotativo se modeló a través de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. Para ello se asume que el proceso se lleva a cabo en estado estable. Xu et al. [62] aplicaron el mismo modelo al estudio de un secador rotativo de biomasa de la industria maderera. El modelo fue validado experimentalmente; y se puede concluir que el secado en contracorriente permite mayores reducciones de humedad (hasta el 2%). Aunque dicha reducción incrementa los riesgos de auto-ignición debido a las temperaturas relativamente altas del medio de secado. Este modelo es representado de manera compacta por,

$$\frac{dX}{dx} = -\frac{R}{M_{wo}} \quad (2-55)$$

$$\frac{dY}{dx} = \frac{R}{G} \quad (2-56)$$

$$\frac{dT_w}{dx} = \frac{Q - \lambda_v R}{c_{pw} M_{wo}} \quad (2-57)$$

$$\frac{dT_a}{dx} = \frac{-Q - c_{pv} R \cdot \Delta T}{c_{pa} G} \quad (2-58)$$

Gigler et al. [63] desarrollaron un modelo dual (matemático - experimental) para predecir la cinética de secado de partículas de sauce, tanto en capa delgada como en pila, el cual es expresado por (2-59). El equipo para estudiar el secado consiste en una serie de canastas perforadas en el fondo. A través de dichas perforaciones se hacía circular aire a una temperatura constante de 20°C y una humedad relativa del 60%. El modelo matemático contiene cuatro ecuaciones de balance

acopladas aplicadas al producto y al aire de secado. El sistema es resuelto por el método de diferencias Crank Nicolson, para el caso de secado en pila; y por el método de Euler hacia adelante, para el secado en capa delgada.

$$\frac{\partial C_{ch}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial C_{ch}}{\partial x} \right) \quad (2-59)$$

$$\rho_w (c_{pw} + c_{pl} M) \frac{\partial T_w}{\partial t} = \rho_w h_v \frac{\partial M}{\partial t} + U (T_a - T_w) \quad (2-60)$$

2.9.7 Modelos Simplificados

Una forma de facilitar el manejo de las ecuaciones de transferencia de calor y masa, asociados al proceso de secado, es asumir un valor de difusión constante. Dicha característica, denominada Difusividad Efectiva (D_{eff}), representa un valor combinado de la difusión de líquido y vapor. Además, este valor incluye mecanismos de transporte como flujo capilar, flujo de presión así como cualquier otro posible mecanismo [45]. Este mismo modelo también fue usado por Giner et al. [64] los cuales modificaron la ecuación con el fin de poderla aplicar a una geometría circular. Este trabajo se desarrolló con el fin de determinar la influencia del número Biot (Bi) en el proceso de deshidratación de manzana y trigo. La expresión principal para este modelo es,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2-61)$$

Adicional a esto, Khraisheh et al. [40] y Chemkhi et al. [36] solucionaron analíticamente la ecuación de difusión de Fick, bajo condiciones iniciales de frontera específicos. Khraisheh et al. [40] aplicaron el modelo a la determinación de la cinética de secado de papa, bajo dos geometrías diferentes: cilindro y rebanadas partiendo de la ecuación básica. La solución analítica para rebanadas está expresada por (2-61) y para cilindros por (2-62) respectivamente. Mientras que Chemkhi et al. [36] desarrollaron un modelo equivalente pero para la arcilla.

$$W = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2} \right] \quad (2-61)$$

$$W = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} \exp \left[\frac{-\beta_n^2 D t}{R_c^2} \right] \quad (2-62)$$

Ruíz y García [65] por su parte, presentan una solución analítica para el estudio del secado en lecho fijo. Dicho modelo parte de la suposición que el secado es controlado por la difusión y que este proceso ocurre a temperatura constante. El modelo, incluyen dentro de la solución la variabilidad del coeficiente de difusión durante el proceso. Las ecuaciones de gobierno son,

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = -k_c a (\bar{X} - X_i) \quad (2-63)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\kappa^2}{\alpha_e} \left[\ln \Psi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\beta)^n}{n \times n!} (\Psi^n - 1) \right] - \frac{2\kappa\eta}{\alpha_e \beta} [\exp(-\beta\Psi) - \exp(-\beta)] \\ & - \frac{\eta^2}{\alpha_e \beta} \left[\Psi \exp(-\beta\Psi) + \frac{\exp(-\beta\Psi)}{\beta} - \exp(-\beta) - \frac{\exp(-\beta)}{\beta} \right] = -\frac{\zeta}{\varepsilon} t \end{aligned} \quad (2-64)$$

También, Ruiz y García [65] propusieron un modelo experimental para determinar algunos parámetros y verificar los resultados. El material usado para el experimento fue rebanadas de mango. El método de secado seleccionado fue convectivo, usando aire caliente como medio de secado. Durante el proceso experimental se usaron varias temperaturas, manteniendo la velocidad del aire constante. Sun et al. [66] desarrollaron un modelo matemático asumiendo que la difusión es el único mecanismo de transferencia de masa. Además asumieron que la transferencia de energía se da únicamente por conducción. Los mismos autores, desarrollaron una bomba de secado en pila, que permite el uso de diferentes métodos de transferencia de energía. Dicho proceso fue aplicado al secado de rodajas de papa. Las ecuaciones empleadas para este modelo son,

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_p D_{eff} \frac{\partial (\rho_m / \rho_p)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_p D_{eff} \frac{\partial (\rho_m / \rho_p)}{\partial y} \right) \quad (2-65)$$

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{px} \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{py} \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) \quad (2-66)$$

Assis et al. [67] y Lacerda et al. [68] estudiaron el secado de un material biológico con geometría cilíndrica. Assis et al. [67] desarrollaron un modelo teórico – experimental con el cual pretendían verificar la influencia del perfil de velocidad del aire en la cinética de secado. Para esto implementaron un dispositivo cilíndrico de secado empleando como biomasa semillas de soya. Esta instalación física está provista de sensores radialmente distribuidos que permiten determinar la cinética de secado en función del radio. Adicional a esto, plantearon un modelo matemático, para el cual partiendo de un balance de masa y energía para la fase líquida y sólida, mientras que Lacerda et al. [68] desarrollaron un modelo simultáneo de transferencia de calor y masa en un secador de lecho móvil con flujo paralelo, empleando como material de secado semillas de soja. El modelo está basado en el balance de masa de las fases sólidas y líquidas, de acuerdo con (2-67) - (2-70).

$$G_{fi} \frac{dW_{ai}}{dx} = f_m a_r \quad (2-67)$$

$$G_s \frac{d\bar{M}_i}{dx} = -f_m a_r \quad (2-68)$$

$$\frac{dT_{fi}}{dx} = -\frac{h a_r (T_{fi} - T_{si})}{G_{fi} (c p_f + W_i c p_v)} \quad (2-69)$$

$$\frac{dT_{si}}{dx} = \frac{ha_r(T_{fi} - T_{si})}{G_s(Cp_s + \bar{M}_i Cp_i)} - \frac{f_m a_r(\lambda_v + cp_v T_{fi} - cp_i T_{si})}{G_s(cp_s + \bar{M}_i cp_i)} \quad (2-70)$$

Pang y Dakin [29] usaron un modelo basado en un balance entre la capacidad calorífica, los cambios en el medio de secado y los cambios de humedad de la madera,

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_v = (TDAL)_v \left[\frac{c_{pv}}{c_{pv} T_{out} + H_{wv}} \right] \cdot \left[\frac{u_v \rho_v \varepsilon_v}{L(1 - \varepsilon_v) \rho_w} \right] \quad (2-71)$$

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_a = (TDAL)_a \left[\frac{c_{pa} + Y_a c_{pv}}{c_{pa} T_{out} + H_{wv}} \right] \cdot \left[\frac{u_a \rho_a \varepsilon_v}{L(1 - \varepsilon_v) \rho_w} \right] \quad (2-72)$$

2.9.8 Modelos Experimentales

Junmeng et al. [69] desarrollaron un modelo para determinar la cinética de secado bajo condiciones no isotérmicas. Para ello realizaron un análisis gravimétrico controlado por computador. También, usaron los resultados experimentales para verificar la precisión de modelos matemáticos comúnmente usados en la literatura. Los modelos usados se listan en la Tabla 4. En este sentido Li et al. [70] presentaron un modelo matemático para determinar la difusividad en condiciones no isotérmicas. Adicionalmente, realizaron la validación del modelo mediante un análisis termogravimétrico. En este modelo la difusividad se puede calcular a partir de la ecuación de Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_{act}}{R_s T}\right) \quad (2-73)$$

Chavan et al. [71] ejecutaron un diseño experimental orientado al secado de la macarela; y posteriormente procedieron a estudiar un total de once modelos matemáticos, con el fin de evaluar cuál se adecuaba mejor a los datos obtenidos experimentalmente. Por su parte Mazutti et al. [42] realizaron una investigación sobre la influencia de la fermentación en la cinética de secado de bagazo de caña. Sometieron a secado convectivo diferentes muestras de bagazo (fermentado y no fermentado), con el fin de obtener las curvas experimentales de secado. Tanto Chavan et al. [71] como Mazutti et al. [42] usaron los métodos estadísticos para determinar cuál de los modelos se ajustaba mejor a los datos experimentales. En la Tabla 5 se listan los modelos matemáticos usados por ambos autores. Es importante resaltar que los modelos no isotérmicos se basan en los isotérmicos aplicando la dependencia de k con la temperatura.

Tabla 4. Modelos para secado no isotérmico. Tomado de [69].

N°	Modelo de Secado	Nombre del Modelo
	Isotérmico	
1	$MR = \exp \left[-D_0 \exp \left(-\frac{E_{act}}{R_g T} \right) \frac{T - T_0}{\beta_r} \right]$	Newton
2	$MR = a \exp \left[-D_0 \exp \left(-\frac{E_{act}}{R_g T} \right) \frac{T - T_0}{\beta_r} \right]$	Henderson y Pabis
3	$MR = a \exp \left[-D_0 \exp \left(-\frac{E_{act}}{R_g T} \right) \frac{T - T_0}{\beta_r} \right] + C_n$	Logarítmico
4	$MR = \exp \left[-D_0 \exp \left(-\frac{E_{act}}{R_g T} \right) \left(\frac{T - T_0}{\beta_r} \right)^n \right]$	Page

Tabla 5. Modelos matemáticos de secado. Tomado de: [71], [42]

N°	Nombre del Modelo	Ecuación Modelo
1	Newton	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
4	Logarítmica	$MR = ae^{-kt} + c$
5	Dos términos	$MR = ae^{-k_0 t} + be^{-k_1 t}$
6	Dos términos exponencial	$MR = ae^{-k_0 t} + (1-a)e^{-kat}$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Aproximación por difusión	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$
9	Verma et al.	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-gt}$
10	Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
11	Modelo de Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$
12	White et al.	$MR = e^{(-kt)^n}$
13	Wang et al.	$MR = a + bt + ct^2$

Por otra parte Mazutti et al. [42] presenta diferentes valores de difusividad efectiva para el bagazo de caña sometido a secado a diferentes temperaturas. Los valores son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de difusividad efectiva del bagazo de caña de azúcar. Modificado de [42].

Descripción		Difusividad Efectiva m ² /s			
		30°C	35°C	40°C	45
Bagazo de caña no fermentada con flujo volumétrico de 2m³/h	1er Periodo	5,82x10 ⁻⁹	7,22x10 ⁻⁹	8,92x10 ⁻⁹	9,67x10 ⁻⁹
	2do Periodo	6,76x10 ⁻¹¹	1,35x10 ⁻¹⁰	1,35x10 ⁻¹⁰	3,38x10 ⁻¹⁰
Bagazo de caña fermentada con flujo volumétrico de 2m³/h	1er Periodo	5,47 x10 ⁻⁹	9,38 x10 ⁻⁹	1,07 x10 ⁻⁸	1,32 x10 ⁻⁸
	2do Periodo	1,22 x10 ⁻¹⁰	1,35 x10 ⁻¹⁰	2,03 x10 ⁻¹⁰	2,70 x10 ⁻¹⁰
Bagazo de caña fermentada con flujo volumétrico de 3m³/h	1er Periodo	9,18 x10 ⁻⁹	1,12 x10 ⁻⁸	1,24 x10 ⁻⁸	1,47 x10 ⁻⁸
	2do Periodo	6,76 x10 ⁻¹¹	2,03 x10 ⁻¹⁰	4,05 x10 ⁻¹⁰	5,40 x10 ⁻¹⁰

2.9.9 Modelo Simplificado y Semi-Empírico

Otra forma de simplificar el modelo matemático, se puede llevar a cabo combinado y, a partir del uso del coeficiente de difusividad efectiva [45],

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_v) = i \quad (2-74)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}_w) = -i \quad (2-75)$$

La combinación de dichas ecuaciones genera la siguiente expresión,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla M) \quad (2-76)$$

Donde $M = (c_v + c_w)$ representa el total de la mezcla. En forma análoga a las ecuaciones anteriores, M está en términos de la masa de agua (incluido el vapor) por unidad de volumen de material. Sin embargo, si el material no sufre contracción durante el secado, se puede remplazar por la masa de agua por unidad de masa seca (contenido de humedad en b.s.).

La difusividad D_{eff} , representa algún tipo de *difusividad efectiva* para el transporte combinado de líquido y vapor. Dicho valor es un valor experimental, que agrupa diferentes mecanismos de transporte así como flujo de presión, flujo capilar, así como otros posibles mecanismos [45].

Por otra parte, Giner et al. [64] usan el mismo modelo con el fin de determinar la influencia del número Biot Bi, en el proceso de deshidratación de manzana y de trigo. En el caso de la deshidratación de trigo, la modelación se lleva a cabo bajo las siguientes expresiones y condiciones,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial W}{\partial t} &= D_{eff} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) & (2-77) \\
t=0 \quad 0 < r < R \quad W &= W_o \\
t > 0 \quad r = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial r} &= 0 \\
t > 0 \quad r = R \quad -\rho_{do} D_{eff} \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{r=R} &= k_p (p_v - p_a)
\end{aligned}$$

Donde ρ_{do} es la relación de masa seca en el volumen del grano, ρ_o es la densidad de la partícula con la humedad inicial, W_o densidad del material húmedo, a_w es la actividad del agua y W es la humedad para un tiempo t . Ellos observaron que no existen diferencias cuantitativas en la predicción de la humedad promedio como función del tiempo, entre el modelo isotérmico y el no isotérmico, el cual agrega un proceso de transferencia de calor acoplado [64].

2.9.10 Formulación de Interfaz Localizada

En esta formulación, la cual tiene en cuenta la evaporación, se asume una interfaz en la cual toda la evaporación se lleva a cabo. Esta aproximación ha sido usada para modelar varios procesos, incluyendo secado, secado por congelación y el freído. Existen varios modelos de evaporación localizada, los cuales tienen varios grados de simplificación. Uno de estos modelos es el desarrollado por Farkas [45], para un problema de fritado, el cual divide en dos regiones, el corazón (la parte interior o región I) y la corteza (la región exterior en contacto con el aceite o región II). La transferencia de calor y masa en el corazón vienen dadas respectivamente por,

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(-D_w \frac{\partial c_w}{\partial x} \right) c_{pw} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff}'' \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-78)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = D_w \frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} \quad (2-79)$$

Por otra parte, en la coraza, el transporte de energía es debido a la conducción y al transporte de vapor, y el transporte de vapor es esencialmente debido al flujo de presión. Las ecuaciones de transferencia de calor y masa son,

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(-\rho_v \frac{k_v}{\mu_v} \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) c_{pv} \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff}' \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-80)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho_v \frac{k_v}{\mu_v} \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) = 0 \quad (2-81)$$

Este modelo considera que toda la evaporación está concentrada en la interface coraza-corazón, por tanto el movimiento de fluido en esta región está relacionado con la evaporación. El balance de energía para esta región viene dada por,

$$\begin{aligned}
 & -k'_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} - k''_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\rho_v k_v}{\mu_v} \frac{\partial p_v}{\partial x} (h_w - h_v) \\
 & = \frac{dX}{dt} \left[(1 - \phi) \rho_s (h_s^I - h_s^{II}) + \phi \rho_v (h_v - h_w) \right]
 \end{aligned} \tag{2-82}$$

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección se presenta el proceso de diseño de la Unidad Experimental, así como el diseño y desarrollo del modelo experimental.

3.1 Diseño y Construcción de la Unidad Experimental

El diseño de la unidad experimental se dividió en dos partes. La primera etapa consistió en el diseño del chasis y el sistema de potencia. En la siguiente etapa se diseñó el sistema de adquisición de datos.

La unidad experimental consta básicamente de tres secciones Figura 26. La primera de ellas consiste en el sistema de potencia, el cual consta de un ventilador axial de 9" con una potencia de 0,25 A y una velocidad que oscila entre 2650 a 3100 rpm, logrando un flujo volumétrico de 490 a 570 m³ h⁻¹ funcionando en vacío. Además tiene un banco de resistencias de 9 kW. El cual está formado por 9 resistencias de 1 kW cada una. La segunda etapa consiste en la cámara de secado, aislada térmicamente con 10 cm de icopor, con el fin de reducir las pérdidas de calor por conducción hacia el exterior. Se seleccionó icopor debido a la relativa baja temperatura que se alcanza en la unidad de secado. Adicional a esto, esta provista del sistema de cinco sensores de temperatura y humedad. También cuenta con una balanza digital que permite registrar las variaciones de peso con una resolución de ± 1 g. La tercera etapa cuenta con un sistema de adquisición de datos, la cual consta de una tarjeta de adquisición de datos y un software que permite la comunicación de la tarjeta con el computador.

El sistema de adquisición cuenta con un total de 5 sensores de humedad y la misma cantidad de sensores de temperatura. Dichos sensores se distribuirán de la siguiente forma: Sensor 1. A la salida del sistema de calentamiento. (Con el fin de medir las propiedades a la entrada de la cámara de secado). Sensores 2, 3 y 4: Distribuidas uniformemente a lo largo de la cámara de secado (Con el fin de determinar el perfil de temperatura y humedad dentro de la misma). Estos sensores tienen la posibilidad de cambiar a diferentes posiciones dentro de la cámara de secado. Sensor 5, a la salida de la cámara de secado (con el fin de medir las propiedades del aire a la salida de la cámara). La medición de peso se llevará a cabo mediante una balanza, sobre la cual reposa la cámara de secado. La balanza cuenta con una salida a puerto serial RS232, lo cual permite registrar los resultados a intervalos de tiempo establecidos.

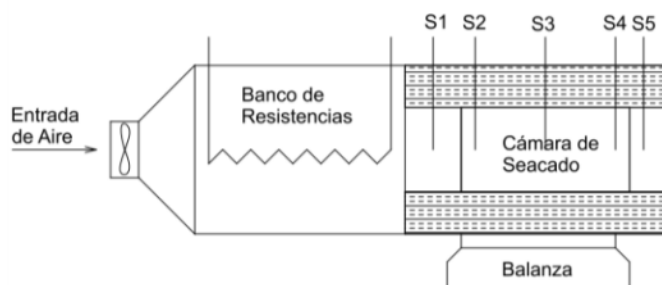
3.1.1 Sistema de Potencia

El cálculo del sistema de potencia de la unidad experimental se inicia seleccionando un ventilador con características acordes con los objetivos planteados en la formulación de la investigación. Siendo una de las principales características, una baja velocidad de flujo, dado que el bagazo presenta una gran cantidad de material particulado. De esta forma, el cálculo de la potencia requerida

para calentar el aire, se llevó a cabo a partir del caudal máximo arrojado por el ventilador (trabajo en vacío) y las condiciones de temperatura promedio para la ciudad de Bogotá D.C., donde se encuentra ubicado el prototipo experimental.



(a)



(b)

Figura 26. Secador a escala de laboratorio. a) vista general; b) diagrama esquemático de la disposición de componentes principales.

Tabla 7. Datos de cálculo del prototipo experimental.

Factor	Valor
Flujo volumétrico de aire	$0,158 \text{ m}^3/\text{s}$
Flujo másico de aire	$0,145 \text{ kg/s}$
Temperatura de entrada del aire ²	288 K
Temperatura de salida del aire	353 K
Energía requerida	8,05 kW

El sistema de potencia cuenta con un controlador de temperatura, el cual incluye una termocupla tipo J y su respectivo controlador. El sistema está conectado con un sistema de interruptor que permite conectar y desconectar el sistema de potencia. De esta forma es posible controlar la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado (ver Figura 27)

² Para el valor de temperatura de referencia se asumió que era constante e igual 288K.



Figura 27. Banco de resistencias con potencia total de 9kW.

3.1.2 Sistema de Control y de Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos consta de 5 sensores de temperatura y humedad, una balanza digital con salida a puerto serial y una tarjeta de comunicación Arduino. Esta tarjeta permite la comunicación de los sensores de temperatura y humedad con el computador. Por otra parte, en el entorno de programación Labview® se creó un código que registra los datos obtenidos por los sensores con una periodicidad variable ente 1 s y hasta 60 s.

Tarjeta de Comunicación

El Arduino Mega es una placa microcontrolador basada ATmega1280. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador; simplemente conectándolo a un ordenador con el cable USB o aliméntalo con un transformador o batería para empezar. El Mega es compatible con la mayoría de shields diseñados para el Arduino Duemilanove o Diecimila [72] (ver Figura 28). Las principales características de la tarjeta se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Características principales de la tarjeta Arduino Mega. Modificado de [72].

Parámetro	Característica
Microcontrolador	ATmega1280
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines E/S digitales	54 (14 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16

Intensidad por pin	40 mA
Intensidad en pin 3,3V	50 mA
Memoria Flash	128 KB de las cuales 4 KB las usa el gestor de arranque (bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz



Figura 28. Vista superior de la tarjeta Arduino Mega. Tomado de [72].

Sensores de Temperatura y Humedad DTH11

Por facilidades en la instalación y operación de la unidad de secado, se seleccionó un sensor tipo DTH11 que integra los sensores de temperatura y humedad (ver Figura 29). Además este sensor viene con una señal digital de salida calibrada. Por lo que no es necesario realizar calibraciones previas al desarrollo de las corridas experimentales. En la Tabla 9 se presentan algunas características del sensor seleccionado [73].



Figura 29. Sensor DTH11. Modificado de [73].

Tabla 9. Datos básicos del sensor DTH11. Modificado de [73].

Ítem	Rango de medida	Precisión de Humedad	Precisión de Temperatura	Resolución
DTH11	20-90%RH 0 – 50 °C	± 5 %RH	±2°C	1 °C/ %

Parámetros	Condiciones	Mínimo	Típica	Máximo
Humedad				
Resolución		1% HR	1% HR	1% HR
			8 Bit	
Repetibilidad			±1% HR	
Exactitud	25°C		±4%HR	
	0 – 50°C			±5%HR
Intercambiabilidad	Intercambiabilidad completa			
Rango de medición	0 °C	30% HR		80% HR
	25 °C	20% HR		80% HR
	25 °C	20% HR		80% HR
Tiempo de respuesta	1/e(63%) 25°C 1m/s air	6 s	10s	15s
Histéresis			±1% HR	
Estabilidad de largo término	Típica		±1% HR / año	
Temperatura				
Resolución		1 °C	1 °C	1 °C
		8 bit	8 bit	8 bit
Repetibilidad			± 1°C	
Precisión		± 1 °C		± 2 °C
Rango de medición		0 °C		50 °C
Tiempo de respuesta	1/e (63%)	6s		30s

Balanza Digital³

La adquisición de peso se lleva a cabo a mediante una balanza digital (ver Figura 30). Esta balanza maneja un puerto serial. Las características de la balanza se presentan a continuación. En la Tabla 10 se presentan las principales características de la balanza.

Tabla 10. Características de la balanza.

Característica	Unidad	Valor
Marca		TAC
Modelo		TCS
Capacidad	kg	30
Resolución	kg	0,001
Tipo de Puerto		Serial RS232
Plataforma		Acero Inoxidable
Bits de comunicación		56

³ Las características de la balanza fueron proporcionadas por el proveedor del producto.



Figura 30. Balanza electrónica

Software de Adquisición de Datos

La programación del software del sistema de adquisición de datos se llevó a cabo en LabView 2012. El software permite adquirir los datos arrojados por los sensores de temperatura, humedad relativa del aire y peso, a partir de los cuales genera informes resumidos en Excel. El software está compuesto de cuatro módulos. El primero realiza la adquisición de datos de temperatura y humedad, el segundo módulo adquiere los datos de peso. El tercer módulo genera el archivo de resumen en formato.xlsx. Por último, el cuarto módulo permite configurar las condiciones de adquisición de datos. La interfaz de la aplicación se presenta en la Figura 31.

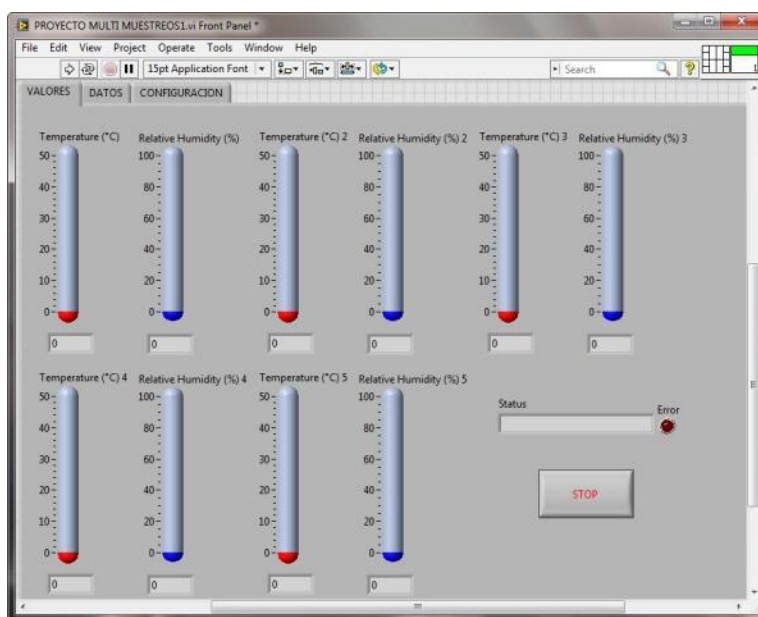


Figura 31. Software de adquisición de datos.

3.2 Resumen

El presente diseño experimental tiene por objeto mostrar los factores fundamentales que gobiernan el proceso de secado de bagazo de caña, que se

obtiene en la industria panelera, en un trapiche típico del municipio de San José de Isnos del departamento del Huila. Para ello se seleccionan 27 muestras y es sometida a un proceso de secado por convección con aire caliente durante 3 horas. El proceso experimental puede ser resumido en el diagrama de flujo presentado en la Figura 32.

3.3 Recolección de la Muestra

Las muestras fueron recolectadas de las bodegas de secado de un trapiche panelero ubicado en el departamento del Huila. Las muestras fueron separadas en cuatro lonas y almacenadas en un lugar seco con el fin de evitar el crecimiento de hongos. Las muestras fueron mezcladas, y dejadas en reposo hasta que alcanzara el equilibrio de la humedad. Una vez se alcanzó el estado de equilibrio, se procedió a determinar la humedad inicial de la muestra. Las muestras fueron obtenidas tal y como sale del proceso de extracción, razón por la cual se hace necesario un tratamiento previo antes del diseño experimental.

3.4 Hipótesis

Es posible mejorar la eficiencia y la eficacia del proceso de secado de bagazo de caña de la industria panelera, bajo un proceso de secado convectivo usando aire como medio de secado, mediante la selección de las combinaciones adecuadas de tamaños de fibra y temperatura del medio.



Figura 32. Resumen del proceso experimental.

3.5 Resultados Esperados del Desarrollo Experimental

- Curvas características de secado del bagazo de caña panelera que se produce en un trapiche típico, en el sector panelero en el municipio de San José de Isnos, departamento del Huila.
- Los perfiles de temperatura y humedad relativa del medio de secado dentro de la cama de secado.
- Definición de los parámetros críticos del proceso y la dirección de mejoramiento del proceso.

3.6 Variables Experimentales

Dado que el proceso de secado involucra transferencia de calor y masa simultánea, se hace necesario dentro de su diseño y optimización, el conocimiento tanto de sus propiedades térmicas como físicas, dentro de las que destacan: calor específico, conductividad térmica, densidad y porosidad [74], velocidad de transferencia de humedad entre el producto y el aire entre otras [75]. Dentro del proceso de secado de bagazo de caña de azúcar del sector panelero se identificaron un conjunto de variables como vitales a la hora de caracterizar la cinética de secado. Las variables identificadas se clasificaron en dos grupos, variables dependientes e independientes, de la forma que se describe a continuación.

3.6.1 Variables Independientes

- Temperatura del flujo de secado
- Tamaño medio de la fibra
- Humedad Inicial de la muestra
- Flujo de aire

Este diseño experimental contempla el estudio de la influencia del tamaño de fibra y la temperatura del flujo de secado. La humedad inicial de la muestra y el flujo de aire se toman constantes e iguales a 50% b.h. y 0,145 kg/s respectivamente.

Si bien la humedad relativa de aire de secado es un factor importante en el proceso de secado, no se realizó un control sobre dicha variable, debido a dificultades técnicas y de costos. Sin embargo la humedad relativa del aire al inicio de las pruebas (temperatura ambiente) se midió, comprobándose que la misma se mantuvo entre el 65% y el 76%.

Tamaño Medio de la Fibra de Bagazo (μ)

Para la reducción de tamaño de las muestra, estas son procesadas en una picadora convencional de pasto. Posteriormente se hizo pasar a través de tamices de 10 mm y 20 mm. El material que queda en el tamiz de 20 mm fue usado como el tamaño de fibra 3. De forma análoga el material que queda en el tamiz de 10 mm se toma como tamaño de fibra 2. Por último, el material que pasa por los dos tamices fue usado como el tamaño 1. En la Figura 33 se muestra la apariencia en tamaño de cada una de las tres muestras.



Muestra 1



Muestra 2



Muestra 3

Figura 33. Muestras de bagazo de caña utilizadas en el desarrollo experimental.

Para determinar la longitud promedio del grano se recurre al código desarrollado en Matlab denominado *measuretool*.⁴ El cual sirve para medir el tamaño de grano a partir de archivos de formato gráfico JPGE. Para determinar el tamaño de la fibra, se llevaron a cabo entre 30 y 40 mediciones por tratamiento. Dichas mediciones fueron tratadas estadísticamente en un software estadístico especializado con el fin de determinar la media, también se llevó a cabo una estudio de normalidad de distribución de los resultados para cada una de la muestras.

Los datos que arrojan la prueba de distribución para la longitud de fibra se muestran en la Tabla 12, mientras que los datos de media y desviación estándar se muestran en la Tabla 11. Como se puede observar para cada caso el valor del

⁴ El software permite determina la longitud y diámetro de la fibra relacionando los pixeles de la imagen jpg con el tamaño real de la imagen.

estadístico es cercano a uno. De la misma forma para cada una de la muestras el valor P es considerablemente superior al valor de referencia (0,05 o 5%); por lo cual se concluye que no se debe rechazar la hipótesis de normalidad, dado que existe un 95% de probabilidad de normalidad de la muestra. En las Figuras 35 a 40 se presentan los resultados gráficos de la prueba de hipótesis de normalidad.

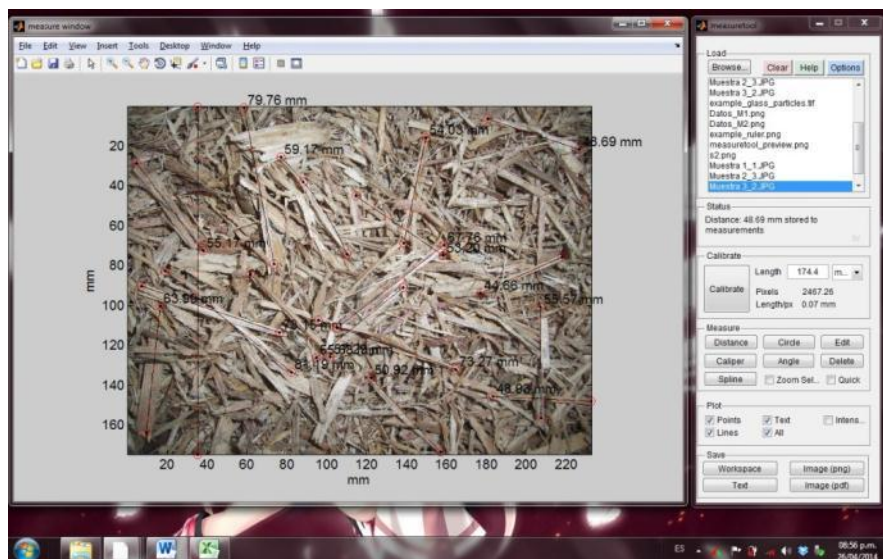


Figura 34. Software de medición de tamaño de fibra

Tabla 11. Resumen para la medición de tamaño de fibra

No. Muestra	Longitud Promedio	Desviación Estándar	Rango de Medidas
Muestra 1	5,74 mm	0,645 mm	3,80 mm – 7,67 mm
Muestra 2	24,39 mm	6,450 mm	5,014 mm – 43,77 mm
Muestra 3	53,77mm	10,86 mm	21,17 mm – 86,359 mm

Tabla 12. Resultados test de normalidad de la muestras

Prueba	Estadístico	Valor-P
Muestra 1	0,9755	0,7314
Muestra 2	0,9618	0,2687
Muestra 2	0,9658	0,3569

Diámetro Medio de la Sección Transversal de la Fibra

Otra característica importante a tener en cuenta a la hora de caracterizar la muestra además de la longitud de fibra es el diámetro de la misma, además de su relación de ésta con la longitud de misma. Para analizar el diámetro de la fibra se lleva a cabo un procedimiento semejante al desarrollado para la longitud de fibra. Los resultados de media y desviación estándar se presentan en la Tabla 13. Mientras que en la Tabla 14 se presentan los resultados de la prueba de normalidad de las muestras.

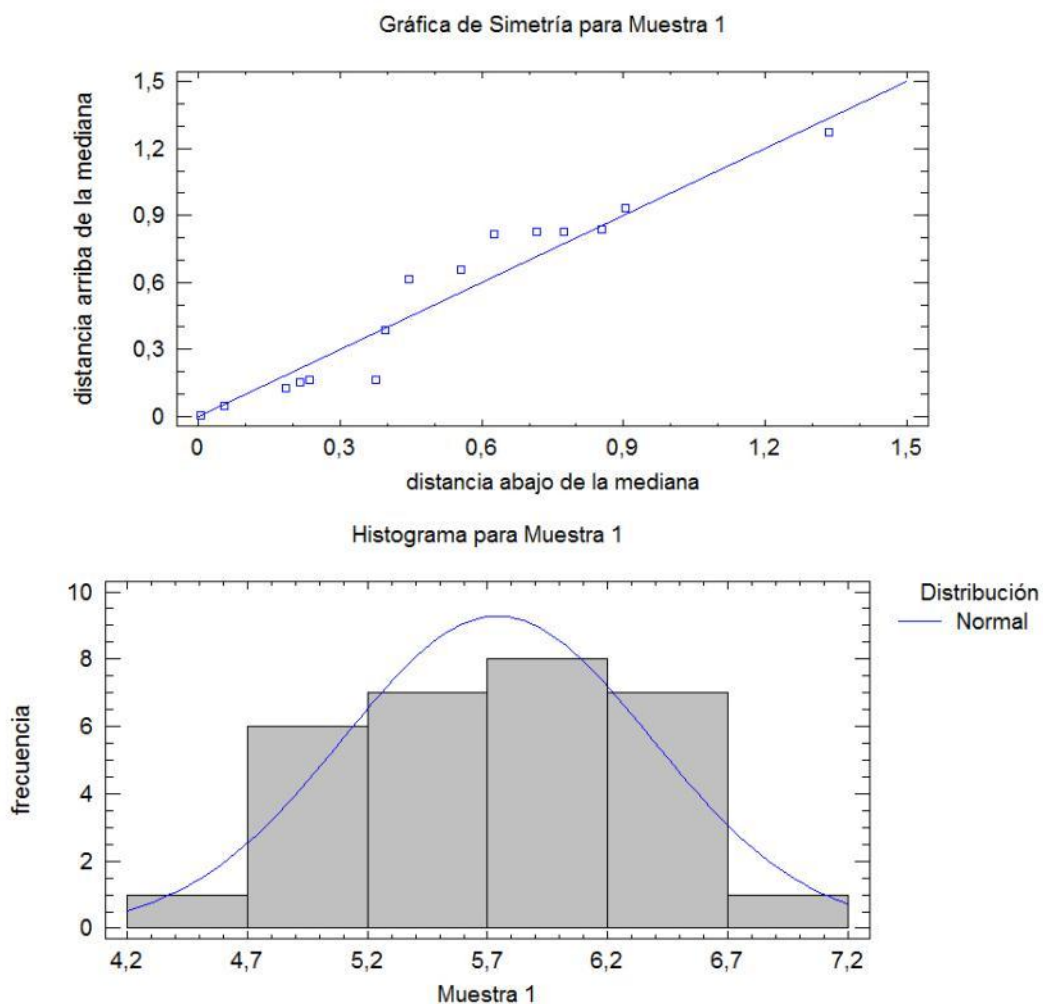
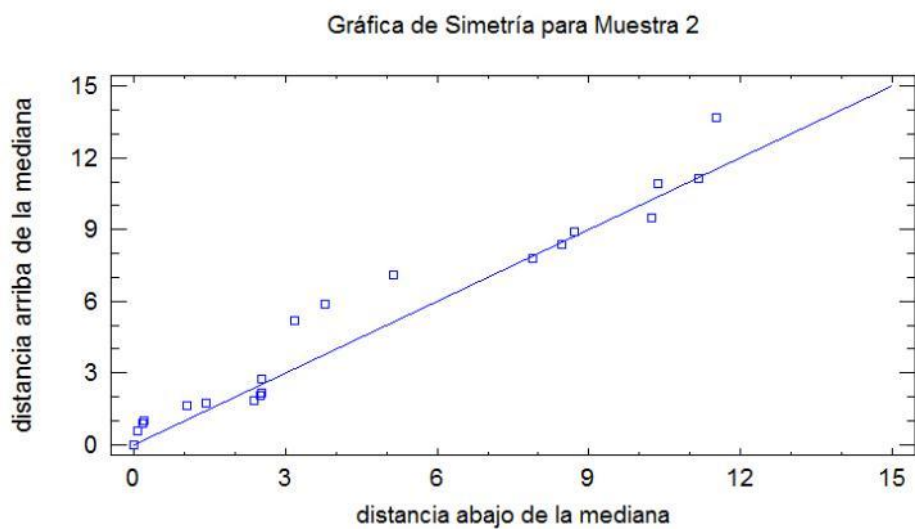


Figura 35. Distancia de la media e histograma, Longitud de fibra. Muestra 1



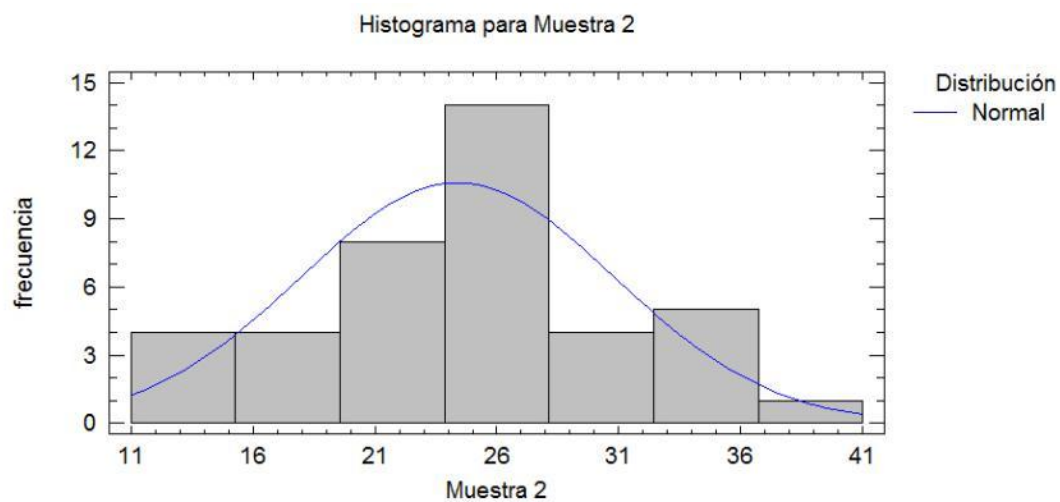


Figura 36. Distancia de la media e histograma, longitud de fibra. Muestra 2

Tabla 13. Resumen medición del diámetro medio de la fibra

No. Muestra	Diámetro Promedio	Desviación Estándar	Rango de Medidas
Muestra 1	0,97mm	0,308mm	0,049mm – 1,899mm
Muestra 2	1,62mm	0,270mm	0,804mm – 2,426mm
Muestra 3	3,11mm	0,540mm	1,485mm – 4,725mm

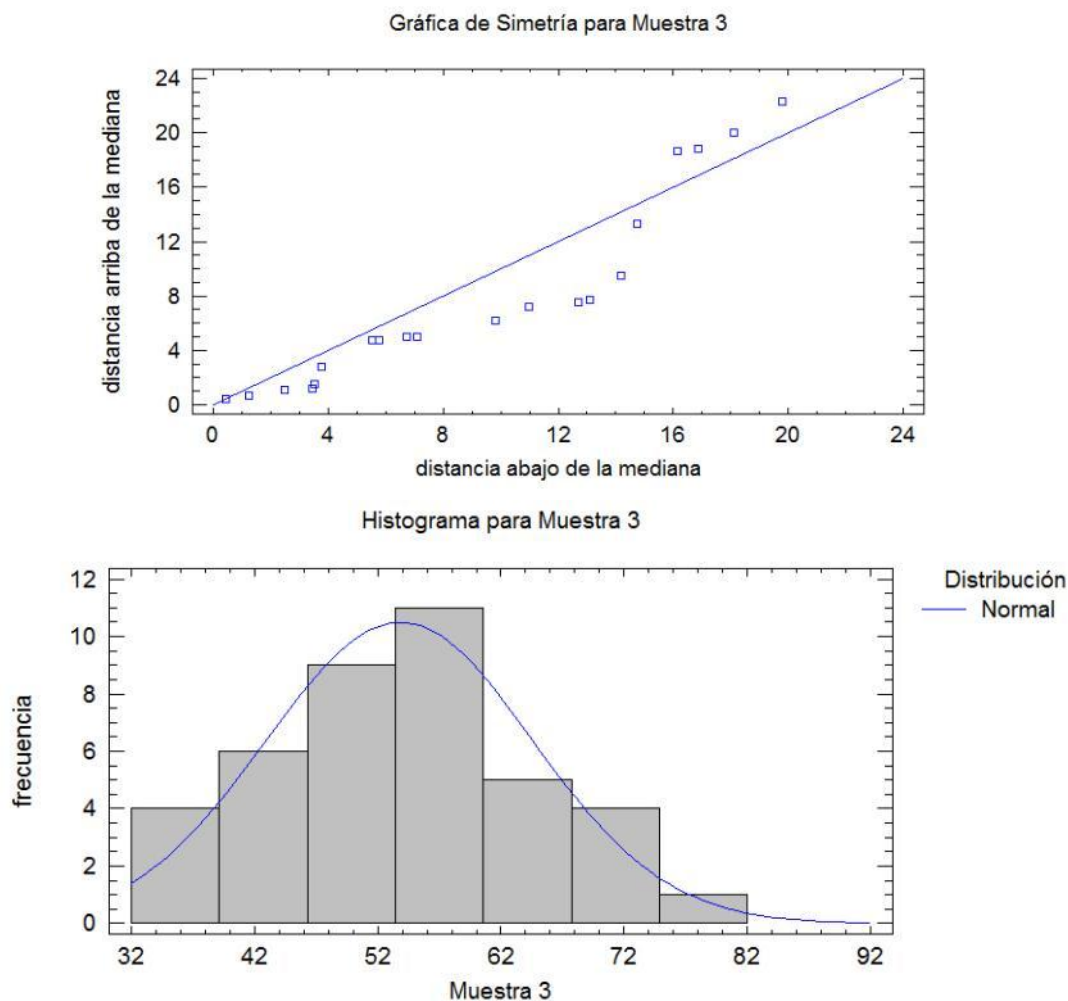


Figura 37. Distancia de la media e histograma, longitud de fibra. Muestra 3

Tabla 14. Resultados test de normalidad de la muestras

Prueba	Estadístico	Valor-P
Muestra 1	0,962132	0,285952
Muestra 2	0,948091	0,175997
Muestra 2	0,968587	0,547477

Como se observa en la Tabla 14, para cada uno de las muestras el valor P es mayor que 0,05 o 5%, por lo que no se debe rechazar la hipótesis nula de normalidad. De igual forma la representación gráfica de la prueba de hipótesis de normalidad.

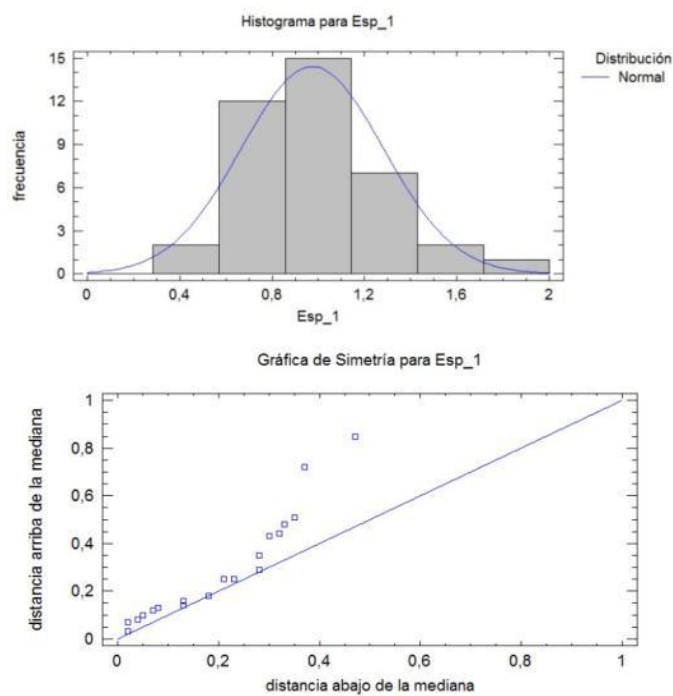


Figura 38. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 1

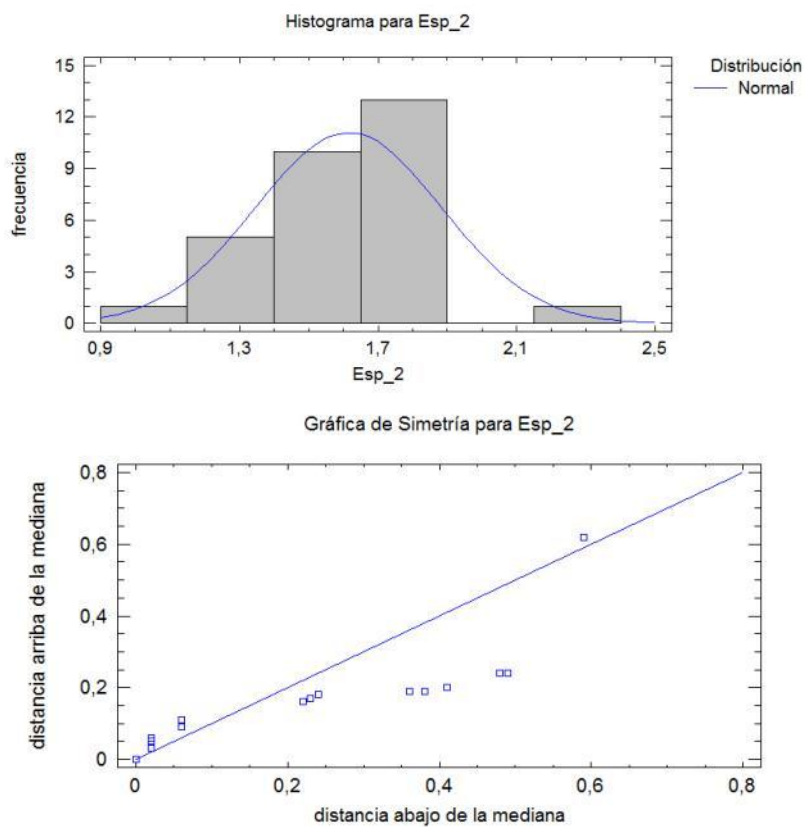


Figura 39. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 2

Por último, como se observa en la Tabla 15 y en la Figura 41, se evidencia una dependencia del diámetro con respecto a la longitud de fibra más o menos lineal.

Tabla 15. Valores de longitud y diámetro de la fibra

No. Muestra	Longitud de Fibra	Diámetro
Muestra 1	5,74 mm	0,97 mm
Muestra 2	24,39 mm	1,62 mm
Muestra 3	53,77mm	3,11 mm

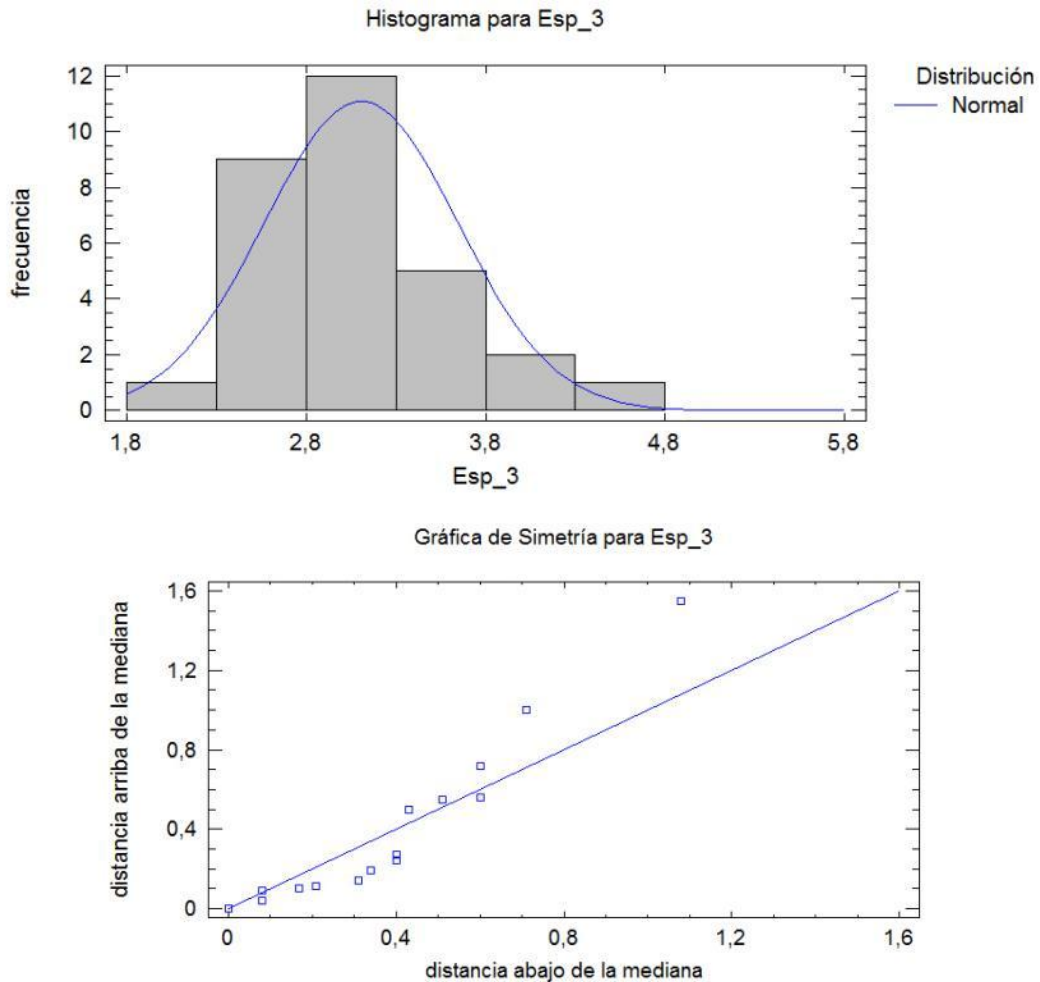


Figura 40. Distancia de la media e histograma, diámetro de fibra. Muestra 3

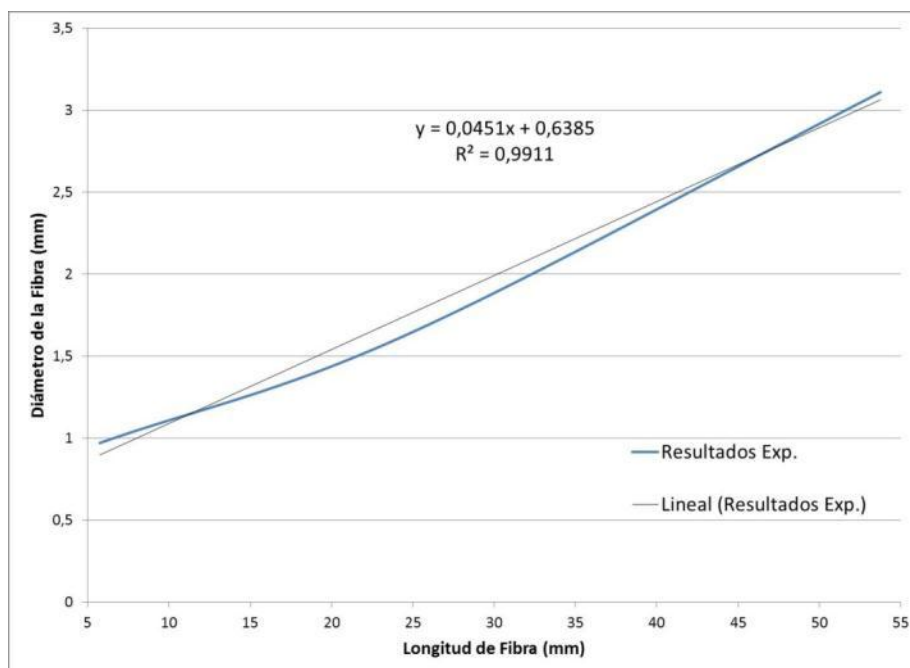


Figura 41. Relación longitud de fibra – diámetro de la misma

Humedad de la Fibra (Wt)

La humedad inicial de la fibra se estableció en 50% b.h. Este valor se selecciona debido a que éste es un valor típico de humedad del bagazo al salir del trapiche [9]. Para garantizar que la humedad en b.h. fuera la requerida, se determina la humedad del material que se va a usar en el proceso experimental y posteriormente se le adiciona el agua que haga falta para alcanzar la humedad requerida.

Para determinar la humedad inicial, se selecciona tres muestras al azar del material a procesar, después de haber permitido que la humedad de la muestra se igualara. Las muestras fueron puestas en una mufla a una temperatura de 80°C dentro de contenedores de papel (ver Tabla 16). Se realizaron mediciones del peso cada hora con el fin de verificar variaciones en el peso de la misma. La prueba se prolongó hasta que no se presentaron variaciones significativas en el peso de las muestra.

Tabla 16. Descripción de las unidades experimentales

	muestra 1 (g)	muestra 2 (g)	muestra 3 (g)
Peso contenedor	0,29	4,68	4,92
peso muestra	9,41	20,00	20,01
peso total	9,7	24,68	24,93

Los datos de peso obtenidos se muestran en la Tabla 16. A partir de estos resultados y de (3-1) se determina la humedad de cada muestra, las cuales fueron

13,82, 11,70 y 11,80% respectivamente, lo cual arroja una humedad media de 12,34%.

Tabla 17. Resultados de pesos obtenidos

No. Medición	muestra 1 (g)	muestra 2 (g)	muestra 3 (g)
1 toma	8,78	22,59	22,91
2 toma	8,48	22,37	22,66
3 toma	8,43	22,35	22,63
4 toma	8,41	22,34	22,63
5 toma	8,40	22,34	22,63

$$M_w = \frac{m_w}{m_T} \quad (3-1)$$

A partir de estos resultados y de la ecuación (3-1), se determina la cantidad de agua que es necesario adicionar, 753 g⁵ por cada mil gramos de muestra. La humidificación se lleva a cabo con un spray, con el fin de homogeneizar la mezcla. Al finalizar el proceso de humidificación, el material es guardado en bolsas herméticas (Ziploc) durante 24 horas, con el fin de terminar el proceso de homogenización.

Duración del Experimento

En la bibliografía especializada, se encontró que en el desarrollo experimental planteado por Mazutti et al. [42] se estudió experimentalmente el secado de bagazo de caña en capa delgada. En este desarrollo, cada corrida tenía una duración de 180 min. En dicho experimento se sometió a secado convectivo diferentes muestras las cuales fueron sometidas previamente a tratamiento superficial.

Temperatura.

Las temperaturas de secado se seleccionaron con la intención de contemplar la viabilidad técnica de reproducir dichos valores de temperatura a partir de sistemas solares planos (ya que estos poseen menor costa de instalación y mantenimiento). Basados en esto, se observa que el rango presentado por los diversos autores, que escriben sobre el proceso de secado solar de fibras vegetales, es bastante amplio y está comprendido entre los 20°C para sistemas pasivos y los 65°C para sistemas de convección forzada [35]. Ahora bien, Mazutti et al. [42] plantea en su estudio sobre el secado de bagazo de caña una rango de temperatura entre los 35 y los 60°C, y si se tiene en cuenta que coincide con los rangos manejados por los

⁵ La cantidad de agua requerida para alcanzar una humedad del 50% b.h. se determina conociendo la cantidad de masa de materia seca y de agua original de la muestra. Con estos datos se determina la cantidad de agua a adicionar.

sistemas solares, por lo cual es en dicho rango donde se ha de trabajar. Los niveles de temperatura del aire de secado se establecen en:

$$t_1 = 35^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 45^{\circ}\text{C}$$

$$t_3 = 60^{\circ}\text{C}$$

Los valores presentados para la temperatura corresponden a la temperatura de calibración del control del sistema de potencia. Sin embargo, en la práctica la temperatura promedio se encontraba aproximadamente 5°C por encima de la temperatura de calibración.

3.6.2 Variables Dependientes

- Tiempo de secado
- Perfil de temperatura dentro de la cama de secado
- Perfil de Humedad relativa del medio de secado dentro de la cama de secado

El tiempo de secado se tomó como un valor constante e igual a 180 min. Valor usado en la investigación sobre secado de bagazo de caña de azúcar desarrollada por Mazutti [42].

Medición del Flujo de Aire

La medición de flujo de aire se llevó a cabo bajo cuatro condiciones fundamentales. La primera de ellas en vacío con el fin de determinar el flujo máximo de aire. Mientras que, las otras tres se usaron para determinar la influencia del tamaño de la fibra en la velocidad del flujo. Las mediciones fueron desarrolladas con termoanemómetro Alnor avm 440, el cual posee un rango operativo de temperatura de 5 a 60°C y un rango de velocidad de 0 a 30 m/s respectivamente.

Influencia del Tamaño de la Fibra

Para determinar la influencia de tamaño de la fibra en el flujo de aire en la cámara de secado, se llevaron a cabo mediciones de la velocidad bajo las condiciones definidas de desarrollo de los experimentos. Sin embargo, por razones técnicas la temperatura máxima usada fue 45°C . Observándose una disminución significativa de las velocidades de flujo con respecto a las mediciones en vacío. Sin embargo se observan variaciones poco significativas de la velocidad para los diferentes tamaños de fibra de bagazo. En la Figura 42 se presentan los resultados de velocidad evidenciándose una variación del 3% entre la velocidad de flujo para el nivel inferior de fibra (6 mm) y el nivel mayor de la fibra (54 mm). De esta forma el rango de velocidades se presenta entre $0,070$ y $0,072$ m³/s.

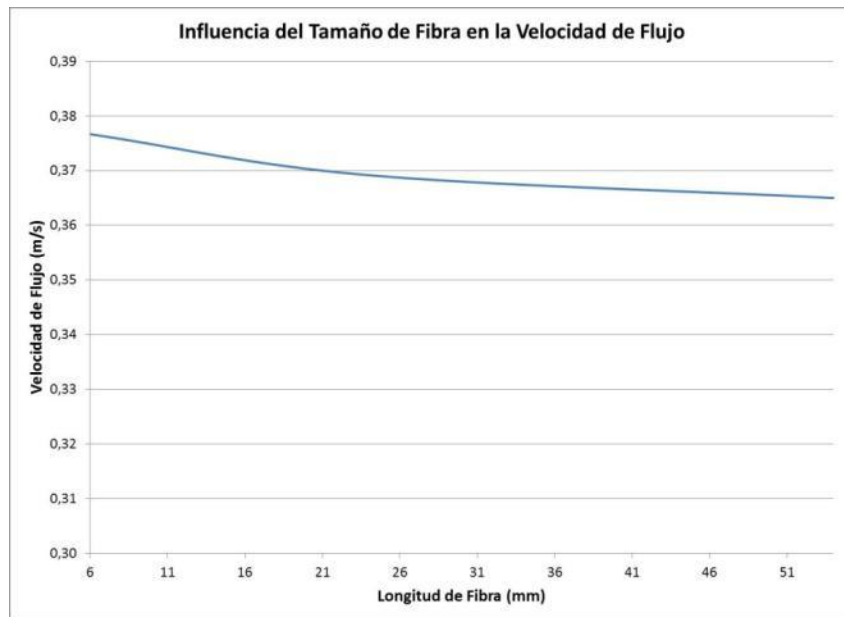


Figura 42. Influencia del tamaño de fibra en la velocidad de flujo.

Influencia de la Temperatura

La influencia de la temperatura en el flujo de aire en la cámara de secado fue estudiada en forma análoga. Para ello, se llevaron a cabo mediciones del flujo de aire para diferentes niveles de temperatura. Posteriormente los valores se promediaron, presentándose los resultados en la Figura 43. Como se puede observar, existe una leve tendencia a aumentar la velocidad con el incremento de la temperatura; sin embargo para el rango en que se llevó a cabo la medición la variación de velocidad de flujo no es significativa ($< 4\%$). El intervalo de variación de flujo volumétrico se encuentra entre $0,072$ y $0,074 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si se tiene en cuenta que la densidad del aire para el rango varía entre $1,060$ y $1,204 \text{ kg/m}^3$, podemos estimar que el flujo másico de aire varía entre $0,074$ y $0,084 \text{ kg/s}$.

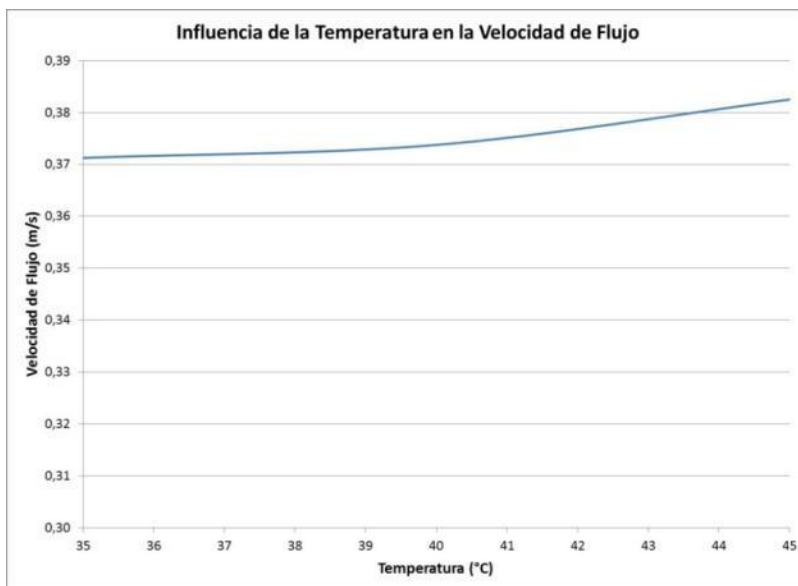


Figura 43. Influencia de la temperatura en la velocidad de flujo

3.7 Materiales

Los materiales necesarios para llevar a cabo el proceso experimental se listan a continuación.

- Molino de paja
- Unidad experimental
- Bolsas Herméticas
- Balanza
- Espray
- Mufla
- Computador

3.8 Tratamiento de los Datos

Dado que la humedad de los materiales sólidos no se puede medir en forma directa, es necesario censar en forma continua el peso de la muestra (balanza). Por lo tanto, antes de realizar un estudio de los datos recolectados durante el proceso experimental, es necesario calcular la humedad a partir de (3-2) que relaciona la pérdida de masa y la humedad de la muestra [76].

$$m_w = \frac{m_1(M_1 - M_2)}{100 - M_2} \quad (3-2)$$

Una vez determinada la humedad, se procede a trazar las curvas de secado, una vez hecho esto, con ayuda de software estadístico se calculan las líneas de

tendencia, así como las correlaciones que existen entre los factores experimentales y la respuesta del sistema.

3.9 Tamaño de la Unidad Experimental

El tamaño de la muestra se determinó experimentalmente para cada uno de las tres muestras usadas. En la Tabla 18 se presentan los tamaños seleccionados.

Tabla 18. Tamaño de la unidad experimental

Tamaño de fibra	Peso (gr)
1	1000
2	650
3	400

3.10 Número de Corridas

Para determinar el número de corridas, se usa el sistema factorial completo, el cual, como se mencionó anteriormente cuenta con dos factores, cada uno con 3 niveles (alto, medio y bajo), por tanto el número de corridas a partir determinado a partir de (3-3), es de 9 [77]. Las corridas experimentales se llevaron a cabo en forma aleatoria con el fin de eliminar el efecto de variables ocultas.

$$N_{Corridas} = N_{Niveles}^{N_{Variables}} \quad (3-3)$$

En la Tabla 19, se listan las diferentes combinaciones que se desarrollarán durante el proceso de experimentación.

Tabla 19. Condiciones de experimentación

N°	Temperatura (°C)	Tamaño de fibra (mm)
1	35	5,74 mm
2	35	24,39 mm
3	35	53,77 mm
4	45	5,74 mm
5	45	24,39 mm
6	45	53,77 mm
7	60	5,74 mm
8	60	24,39 mm
9	60	53,77 mm

3.11 Preparación de la Muestra

Antes de ser sometido al proceso de secado, es necesario realizar una preparación de la muestra. Esto se hace necesario debido a que el material es recibido tal y como sale del proceso de molienda. De esta forma presenta niveles

de humedad desconocidos, así como una elevada variabilidad en el tamaño de la fibra. La preparación de la muestra consta de dos fases. En la primera se realiza la reducción de tamaño del material (triturado). En la segunda se lleva a cabo la determinación experimental de la humedad contenida en la muestra. Por último, se procede al almacenamiento de las muestras en un lugar adecuado.

Una vez separados los tres tamaños de muestra, se determina la longitud media de las muestras experimentales. Para ello se usó de una aplicación de medición de fibra se determinó la longitud media de cada muestra. Los valores medios se presentan en la sección 3.6.1.

Humidificación del Muestra

Se selecciona el tamaño de la muestra, los cuales corresponden a los valores de longitud de fibra que se presentan en la sección 3.6.1. Se verifica el peso de la muestra en una balanza electrónica, cuya resolución es de 0,1 g. El peso correspondiente para cada una de las muestras se presenta en la Tabla 20.

A partir del peso de la muestra y del contenido de agua inicial de la muestra, se determina la cantidad de agua requerida para obtener una humedad del 50% b.h. El cálculo de la cantidad de agua es determinado en la sección 3.6.1. Para cada caso la cantidad de agua que se requiere usar en cada muestra se calcula a partir de (3-4).

Tabla 20. Peso de la muestra.

Tamaño de fibra	Peso (g)
1	1000
2	650
3	400

$$Y(g_{H_2O}) = X(g_{Bagazo}) \cdot \frac{745(g_{H_2O})}{1000(g_{Bagazo})} \quad (3-4)$$

La cantidad de agua requerida para cada experimento se pesa y se mezcla uniformemente con la muestra de bagazo. Cada una de las muestra se prepara como mínimo 24 horas antes de ser sometida al proceso de secado, esto con el fin de garantizar la homogeneidad de la muestra.

3.12 Análisis Numérico

Los análisis estadísticos de los datos obtenidos en el experimento se llevarán a cabo sobre los resultados finales de humedad. Esto con el fin de determinar modelos empíricos que permitan determinar cuáles son las condiciones ideales de secado. También, se analizan los perfiles de temperatura y humedad relativa del aire de secado al interior del colchón de secado, así como el perfil de variación de

humedad de la muestra. Por último se efectuaron pruebas de hipótesis con el fin de verificar si existes diferencias estadísticamente significativas para cada uno delos tratamientos.

3.13 Resultados Esperados

Los resultados que se persiguen con el desarrollo experimental son los siguientes:

1. Los perfiles de temperatura y humedad relativa del medio de secado a lo largo del colchón de bagazo.
2. Humedad final en función de las variables independientes (temperatura del aire de secado y tamaño medio de la fibra).
3. Modelo empírico e identificación de las mejores condiciones para el proceso de secado en pila del bagazo de caña panelera.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados está dividido en dos partes. En la primera se verificará si existe una diferencia estadísticamente significativa para cada uno de los niveles estudiados durante el proceso experimental. Para ello se recurrirá a un análisis de varianza y una prueba de Student. En la segunda parte se lleva a cabo un análisis de los resultados a través del método de superficie de respuesta, con el fin de determinar la influencia de las variables independientes, así como determinar el modelo matemático que más se aproxime a los datos obtenidos experimentalmente. Para este último punto se usó un software estadístico especializado.

4.1 Proceso de Análisis

Dado que no es posible determinar la humedad del material en forma directa, la variación de misma se obtiene a partir de la variación del peso. Dicha suposición es razonable, debido a que se manejan temperaturas relativamente bajas, por lo que no se espera emisiones significativas de material orgánico volátil. De la misma forma la humedad final se obtiene al aplicar la formula estándar de variación de humedad, teniendo en cuenta la variación de peso de la muestra.

$$W = \frac{\Delta Peso}{Peso_{Total} - \Delta Peso} \quad (4-1)$$

A partir de (4-1) se determina el valor final de humedad global de la muestra, donde $\Delta Peso$ es la variación de peso de la muestra al ser secada. Los valores de la humedad se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Datos de humedad final de las 27 corridas

	Longitud de Fibra	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
35	6	45,23%	45,32%	45,32%	45,29%
	24	24,84%	29,38%	19,61%	24,61%
	54	11,42%	3,02%	5,78%	6,74%
45	6	42,72%	43,33%	44,46%	43,50%
	24	16,13%	20,98%	14,17%	17,09%
	54	5,94%	6,49%	0,53%	4,32%
60	6	41,50%	42,39%	43,60%	42,50%
	24	2,74%	2,20%	15,47%	6,80%
	54	1,55%	1,81%	1,65%	1,67%

Una vez obtenida la información completa de los resultados experimentales, estos valores se compararon mediante pruebas estadísticas para determinar si existen o no diferencias significativas entre los resultados.

Tabla 22. Datos para el análisis ANOVA.

	T=35°C	T=45°C	T=60°C
L=6 mm	0,45	0,25	0,11
	0,45	0,29	0,03
	0,45	0,20	0,06
L=24 mm	0,43	0,16	0,06
	0,43	0,21	0,06
	0,44	0,14	0,01
L=54 mm	0,42	0,03	0,02
	0,42	0,02	0,02
	0,44	0,15	0,02

Como se puede observar en la Tabla 21, se obtuvieron resultados óptimos del proceso de secado en 18 de las 27 corridas experimentales. Esto es, se obtuvieron valores de humedad final inferiores a las planteadas en la bibliografía como óptimas para el proceso de combustión en cerca del 67% de las corridas experimentales. Por lo cual, se puede concluir que es viable el secado de biomasa bajo las condiciones estudiadas experimentalmente.

4.1.1 Análisis de Varianza

Se llevó a cabo un análisis de varianza, con el fin de comparar las medias de los resultados de humedad final obtenidos. Para ello se ejecutó un análisis de dos variables y tres repeticiones. Se usó como límite de existencia de diferencias un nivel de significación de 5%. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la Tabla 23. El análisis de varianza es una prueba de hipótesis en la cual se determina si existen variaciones significativas en la media de dos muestras. Para este caso, haciendo uso de la herramienta de Matlab® anova2 que permite la comparación simultánea de las filas y columnas. Los datos ingresados en el análisis de ANOVA se presentan en la Tabla 22.

Hipótesis nula: No existen diferencias en la humedad final del bagazo de caña panelera variando la temperatura y la longitud de fibra. Se usa como criterio para rechazar la hipótesis nula (medias iguales) un estadígrafo $p < 0,05$. Como se observa en Tabla 23, existen evidencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula tanto para la influencia de la temperatura (columnas), como para la influencia del tamaño de fibra (filas). Por lo que es posible asegurar que para cada muestra existe por lo menos un tratamiento que presenta diferencias significativas en la medias.

Tabla 23. Resultados análisis ANOVA

Fuente	SS	Df	MS	F	Prob>F
Columnas	0,73961	2	0,36981	269,08	0
Filas	0,03302	2	0,01651	12,02	0,0005
Interacción	0,01998	4	0,00499	3,63	0,0244
Error	0,02474	18	0,00137		
Total	0,81735	26			

4.1.2 Prueba de t de Student

Por último se llevó a cabo una prueba de medias de Student con un nivel de significancia de 5% y una hipótesis nula en la que las medias de las muestras son iguales y las desviaciones estándar son iguales. El valor del estadígrafo se determina a partir de (4-2). Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 25 y 26. La prueba de Student se lleva a cabo a pesar del tamaño de la muestra es pequeña (tres muestras). Sin embargo, como demostró Winter [78] es posible obtener resultados satisfactorios con pruebas de hipótesis para una y dos variables con tamaños muestrales $n < 5$.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (4-2)$$

La prueba de Student se llevó a cabo con el fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las muestras. Para ello se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos en cada uno de los bloques. La prueba de hipótesis se realizó en Matlab®. La hipótesis nula para cada caso es la igualdad de las medias de las muestras. Para cada caso si el valor de h es igual a 1, significa que la hipótesis es rechazada; mientras que un valor de h igual a 0 indica que no hay evidencias estadísticamente significativas que permita rechazar la hipótesis nula. Para ello se usó un error tipo I del 5%, asumiendo además que las varianzas de las muestras son iguales. En la Tabla 24 se presentan la codificación usada para cada una de los tratamientos.

Tabla 24. Codificación de muestras para la prueba de Student.

Tratamiento	Código
T=35°C, L=6mm	1
T=35°C, L=24mm	2
T=35°C, L=54mm	3
T=45°C, L=6mm	4
T=45°C, L=24mm	5
T=45°C, L=54mm	6
T=60°C, L=6mm	7
T=60°C, L=24mm	8
T=60°C, L=54mm	9

Tabla 25. Valores de la prueba t de Student para L constante

Condiciones	h	Valor p	Grado de Libertad	Estadístico	Desviación Estándar
Bloque 1 vs 4	1	0,0251	4	3,3891	0,0063
Bloque 1 vs 7	1	0,0101	4	4,5918	0,0075
Bloque 4 vs 7	0	0,2744	4	1,2655	0,0097
Bloque 2 vs 5	0	0,0964	4	2,1648	0,0425
Bloque 2 vs 8	1	0,0263	4	3,4412	0,0634
Bloque 5 vs 8	0	0,0979	4	2,1507	0,0568
Bloque 3 vs 6	0	0,4806	4	0,7768	0,0382
Bloque 3 vs 9	0	0,1098	4	2,0492	0,0303
Bloque 6 vs 9	0	0,2371	4	1,3894	0,0233

Como se puede observar en la Tabla 25 no es significativa la influencia de la temperatura, y no existen diferencias estadísticamente significativas en los valores humedad final para la mayoría de los tratamientos. Por lo cual, se puede concluir que los valores de humedad final son iguales para los diferentes niveles de temperatura.

Tabla 26. Valores de la prueba t de Student para T constante.

Condiciones	h	Valor p	Grados de Libertad	Estadístico	Desviación Estándar
Bloque 1 vs 2	1	0,0181	4	7,3270	0,0346
Bloque 1 vs 3	1	0,0000988	4	15,5919	0,0303
Bloque 2 vs 3	1	0,0089	4	4,7624	0,0460
Bloque 4 vs 5	1	0,0002239	4	12,6636	0,0255
Bloque 4 vs 6	1	0,00003769	4	19,8915	0,0241
Bloque 5 vs 6	1	0,01	4	4,6026	0,0340
Bloque 7 vs 8	1	0,0012	4	8,1505	0,0536
Bloque 7 vs 9	1	$0,0318 \cdot 10^{-7}$	4	66,6732	0,0075
Bloque 8 vs 9	0	0,3024	4	1,1828	0,0531

Por el contrario, en la Tabla 26 se observa que las hipótesis de igualdad son rechazadas, para casi todos los casos con excepción de la comparación de los tratamientos 8 y 9, en los cuales no es posible rechazar la hipótesis de igualdad de medias. Sin embargo, esta igualdad en el promedio de las humedades finales, se puede deber a que para el tratamiento 9, si bien hay un mayor gradiente en la caída de la temperatura, se observa que se alcanza la humedad final en un tiempo inferior al tiempo límite establecido para las corridas experimentales. Esto último se puede visualizar claramente en la Figura 62.

4.1.3 Representación Gráfica

Por último, se desarrolló la gráfica de la influencia en la humedad final de la temperatura (ver Figura 44) y del tamaño de fibra (ver Figura 45). Como se puede

observar, en la Figura 44, la dependencia de la humedad final con la temperatura de la muestra es lineal. De otra forma, la dependencia de dicha variable con el tamaño de fibra se adecúa mejor a una regresión polinómica de segundo grado Figura 45. Por último, en la Figura 46 se muestra la superficie de respuesta del estudio experimental. Esta gráfica se construye a partir de (4-3), la cual es generada por un software estadístico especializado.

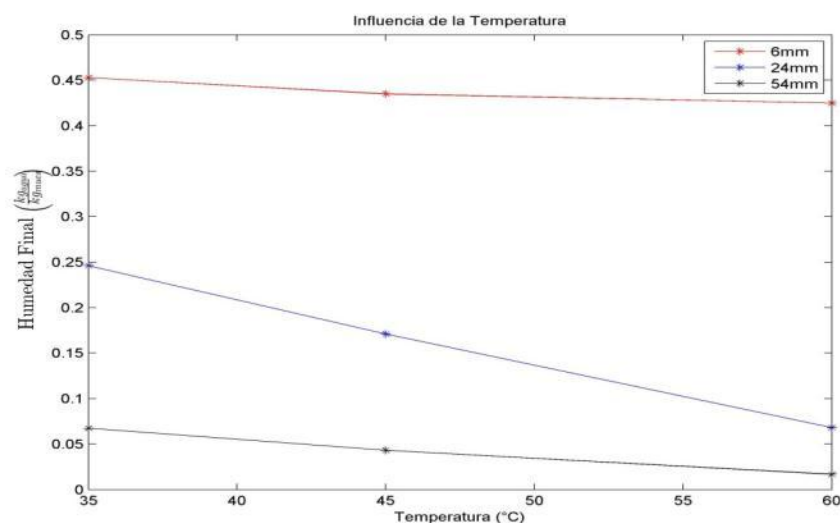


Figura 44. Influencia de la temperatura en la humedad final de la muestra.

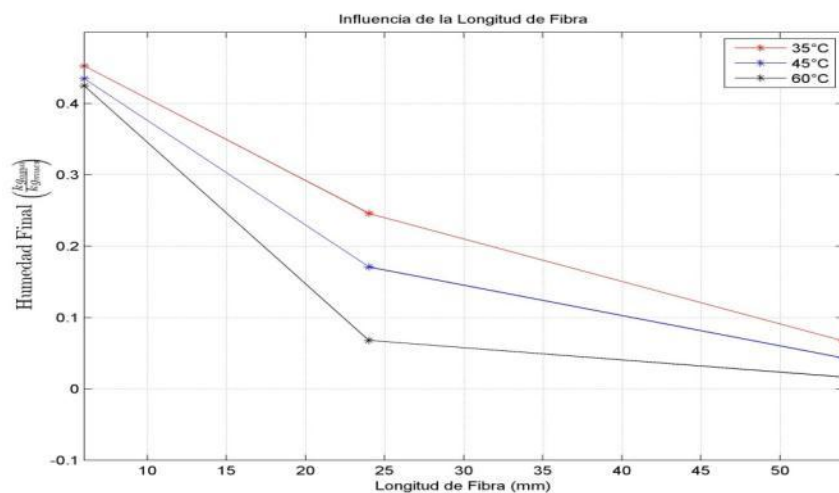


Figura 45. Influencia del tamaño de fibra en la humedad final.

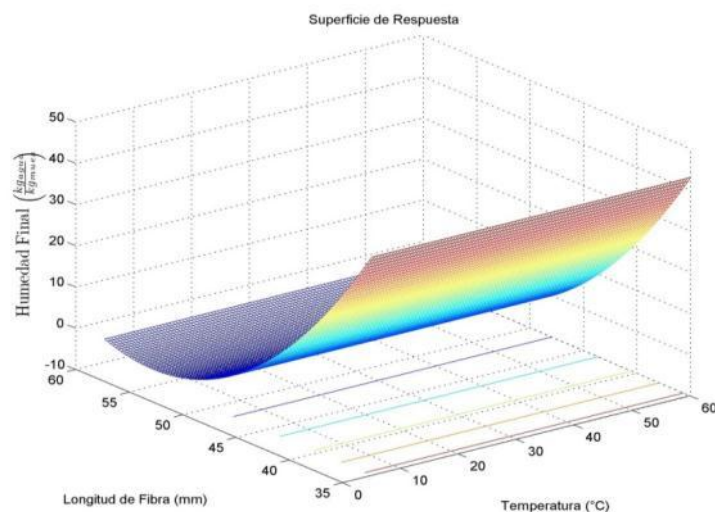


Figura 46. Superficie de respuesta para la humedad final vs. temperatura de entrada del medio de secado y el tamaño de fibra.

4.1.4 Análisis del Experimento

Los resultados de humedad fueron recreados usando un software estadístico especializado, en el cuál se ingresó cada uno de los 27 resultados de humedad final obtenidos experimentalmente. Una vez hecho esto se procedió a realizar un análisis de superficie de respuesta. Como se observa en la Figura 47, la mayor influencia sobre la variación de la humedad es la variable tamaño de la fibra. Dicho comportamiento también se puede observar en la Figura 48. En donde además, se puede observar que tanto el tamaño de fibra como la temperatura presentan una influencia inversa, mientras que las interacciones presentan influencia directa. También se observa una tendencia a aumentar la humedad final, lo cual se puede deber al aumento del camino recorrido por el medio de secado dentro de la muestra de biomasa.

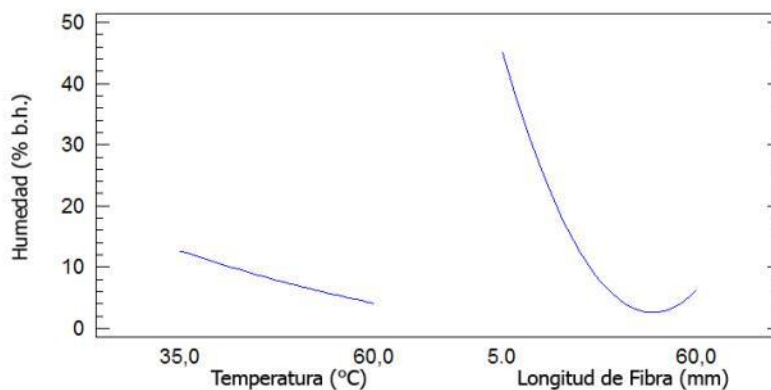


Figura 47. Efectos principales para la humedad final.

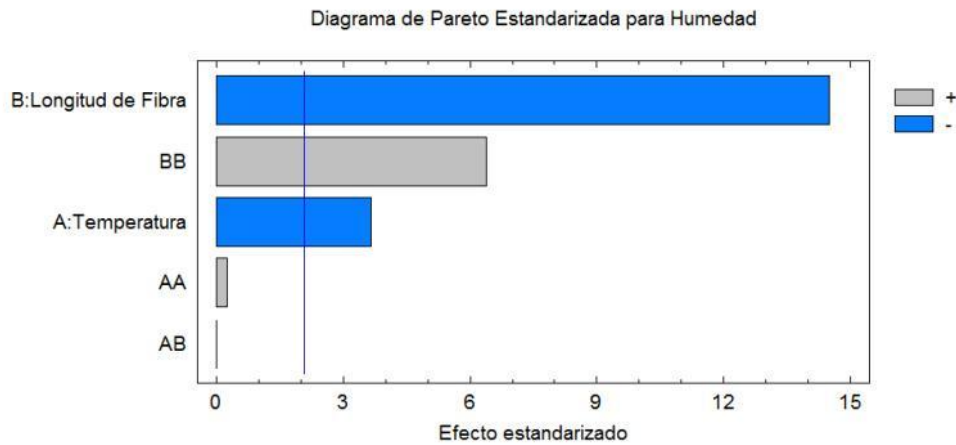


Figura 48. Diagrama de Pareto estandarizado para humedad final.

Por último, también es importante resaltar que la influencia de la temperatura no es significativa. De igual forma, se observa que la interacción entre la temperatura y la humedad no tiene alguna influencia en el resultado de valor de humedad final.

4.1.5 Modelo Empírico

A partir de los datos obtenidos, se pudo deducir una expresión empírica (superficie de respuesta), la cual se presenta en la Figura 46. Adicionalmente, se obtiene la ecuación de la superficie de respuesta (4-3).

$$W = 72,2962 - 0,649557T - 2,24281L + 0,00323407T^2 \quad (4-3) \\ + 0,00000190954TL + 0.0236564L^2$$

Este modelo ajustado permite explicar el 94,54% de la variabilidad presentada en la humedad final.

4.1.6 Dispersión de Resultados para Muestras Generales

En las Figuras de la 49 a la 56 se presenta la influencia que cada uno de los factores experimentales tiene sobre la humedad final de la muestra. Para ello se recurre al uso de gráficos de caja y bigotes. Inicialmente se realizó una comparación de los factores experimentales por separado. Lo anterior con el fin de verificar que tanta dispersión genera cada factor por separado. Posteriormente se llevó a cabo un estudio individual de cada uno de los factores.

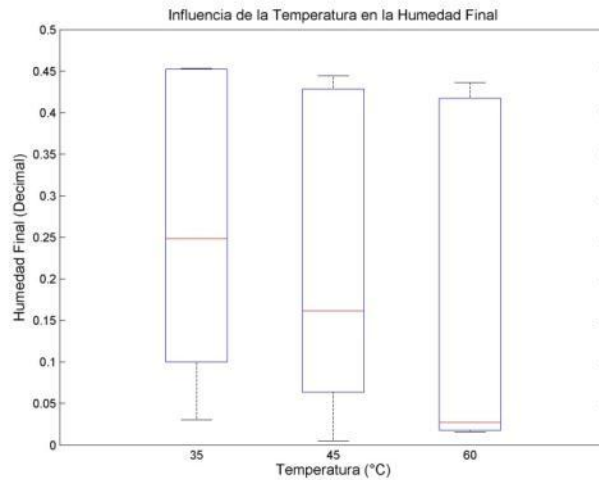


Figura 49. Influencia de la temperatura en la humedad final.

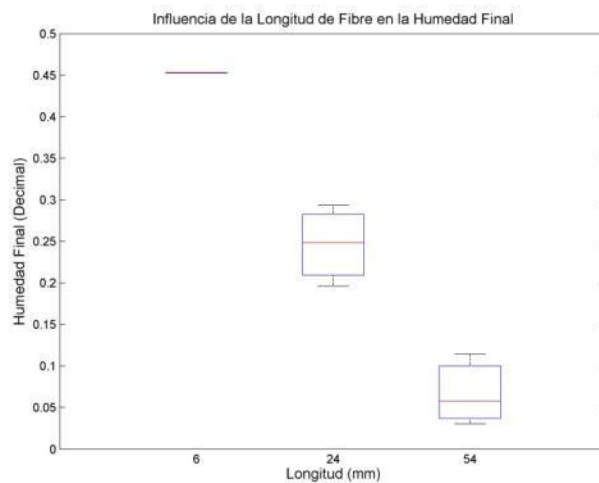


Figura 50. Influencia del tamaño de fibra en la humedad final.

Como se puede observar en la Figura 49, existe una gran dispersión en los resultados con respecto a la temperatura. Esto debido a la influencia tan marcada que tiene el tamaño de fibra en la humedad final de la muestra. Por otra parte, en la Figura 50 se observa una menor dispersión. Lo cual evidencia que para un determinado tamaño de fibra, la temperatura del medio de secado es un factor de menor relevancia en los resultados finales.

El mismo estudio de dispersión se llevó a cabo para cada uno de los factores experimentales. Como se puede observar los peores resultados de secado se obtuvieron con una longitud de fibra $L=6$ mm, sin importar la temperatura del medio de secado, ver Figura 51. También se nota una marcada tendencia a la reducción de la humedad final a medida que se incrementa el tamaño de la fibra.

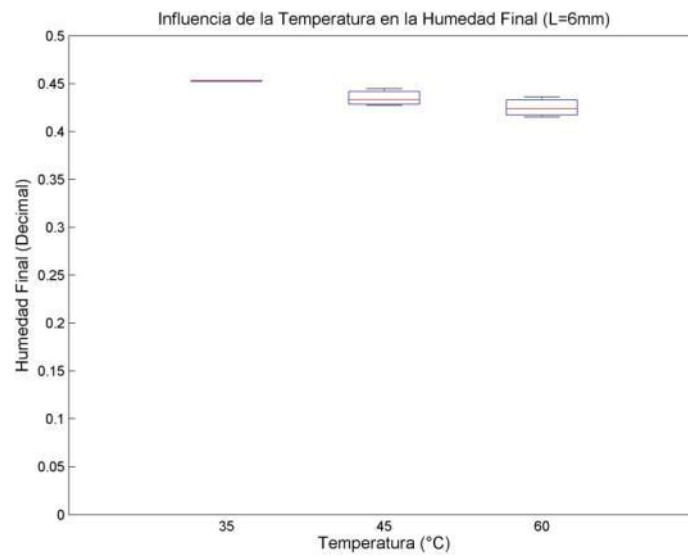


Figura 51. Dispersión humedad final para L=6 mm.

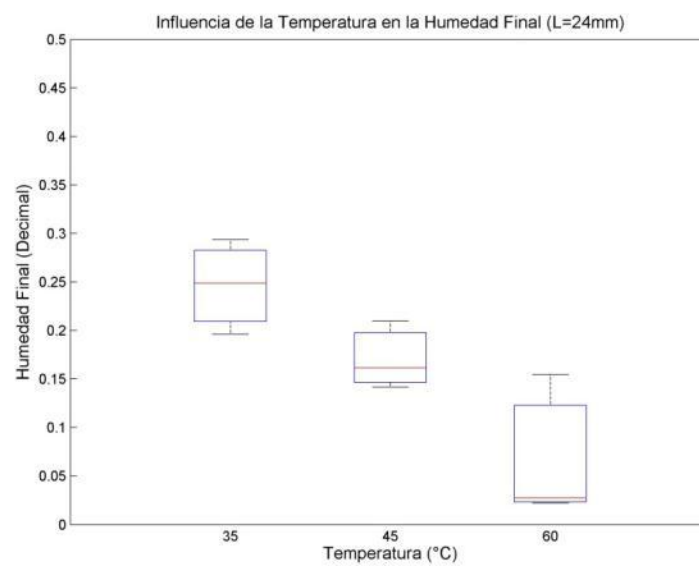


Figura 52. Dispersión humedad final para L=24 mm.

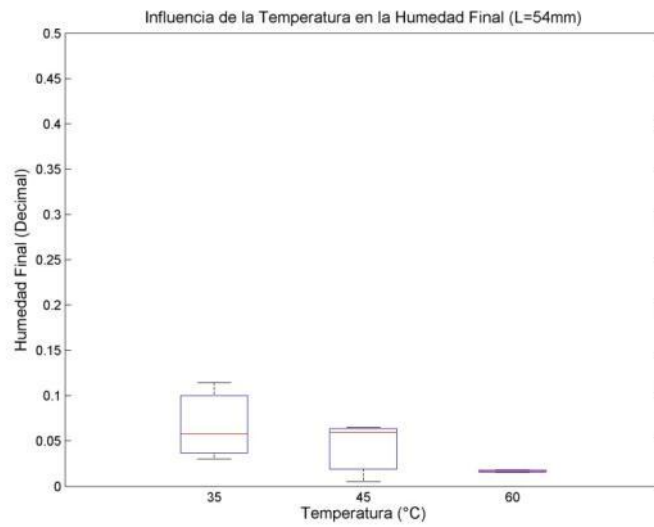


Figura 53. Dispersión humedad final para L=54mm.

Por otra parte, la influencia del tamaño de fibra es mayor como se puede observar en las gráficas a continuación. Las variaciones que se presentan en la humedad final se mantienen más o menos constantes para cada nivel de temperatura.

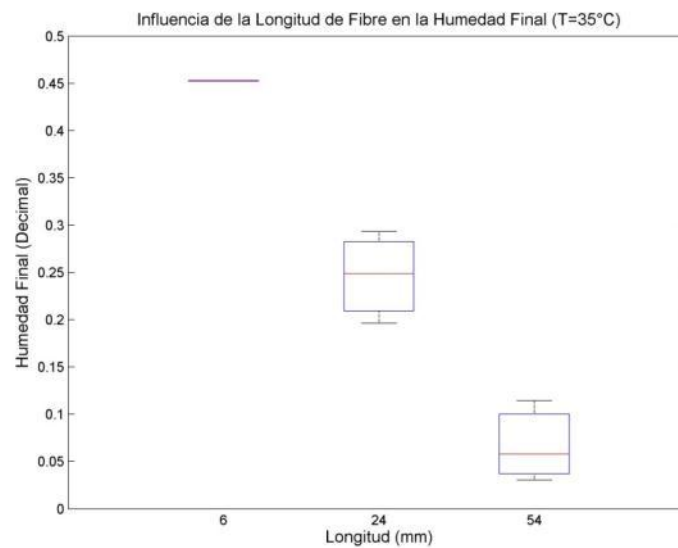


Figura 54. Dispersión humedad final para T=35°C.

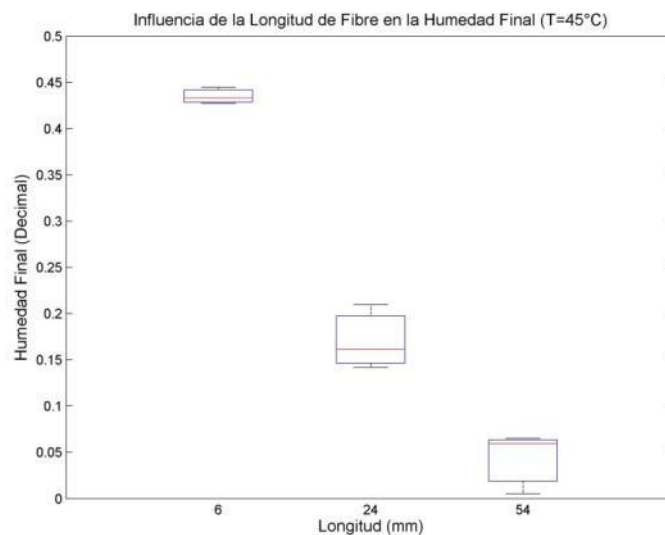


Figura 55. Dispersión humedad final para T=45 °C.

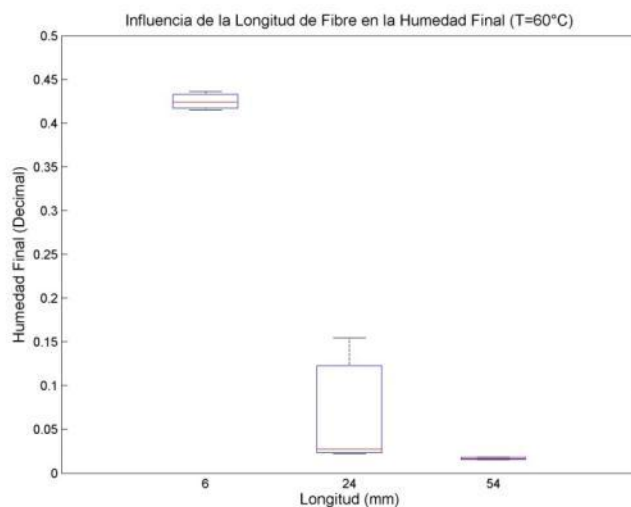


Figura 56. Dispersión humedad final para T=60 °C.

4.2 Estudio de la Cinética de Secado

En esta sección se presenta un análisis del comportamiento de las variables que se midieron durante el proceso de secado, con el fin de entender un poco más la cinética del proceso de secado. En especial de la variación de humedad, la cual al no poderse medir en forma directa se determina a partir de la variación de peso.

Una característica importante de las curvas de secado, es el hecho que en la mayoría de las gráficas del perfil de relación de humedad no se evidencia el periodo de secado de rapidez constante, presentándose una tendencia marcadamente exponencial en todo el recorrido.

4.2.1 Influencia del tamaño de fibra

Como se observa en la Figura 57, para el nivel bajo de tamaño de fibra ($L=6$ mm) existe una dependencia débil de la humedad final con respecto a la temperatura del medio de secado. Sin embargo, a medida que el tamaño de fibra aumenta, se empiezan a presentar diferencias más marcadas tanto en la cinética de secado como en la humedad final de la muestra. Esto se evidencia en las figuras 58 y 59, en las cuales se observan mayores velocidades en la caída de humedad, así como valores de humedad final más bajas a medida que la temperatura aumenta para cada tamaño de fibra. Además, la influencia de tamaño de la fibra en la variación de humedad de la muestra se evidencia también en los perfiles de temperatura y humedad dentro del colchón de secado. Esto se puede apreciar en los Anexos 3 y 5, donde se evidencia que a mayor longitud de fibra la muestra se acerca al equilibrio térmico con el medio de secado en un menor tiempo.

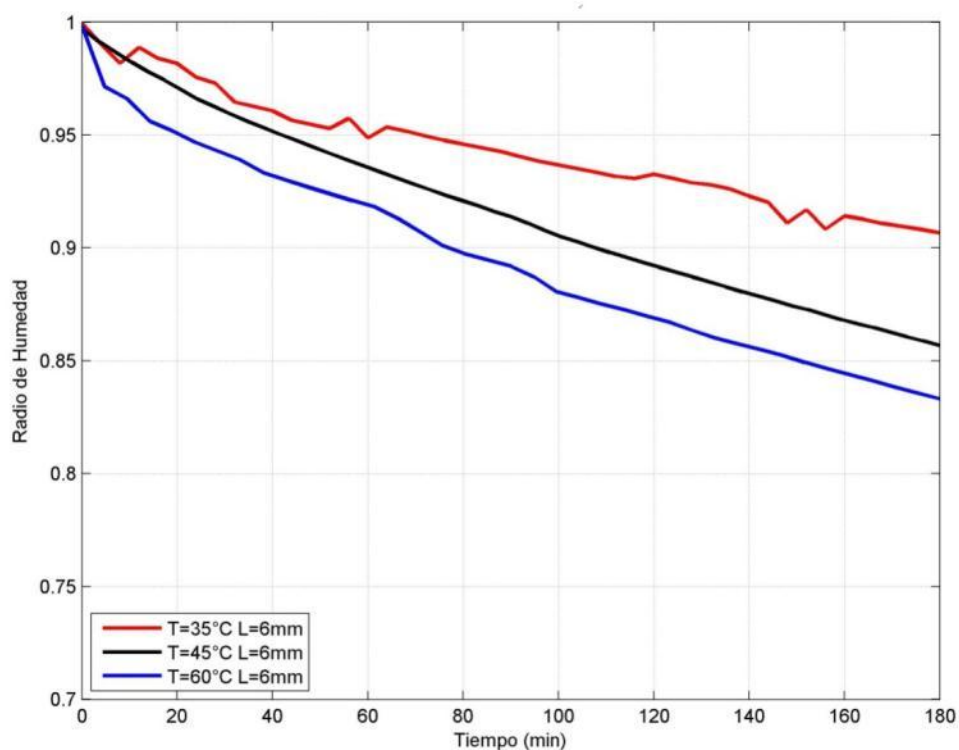


Figura 57. Influencia de la temperatura para $L= 6$ mm.

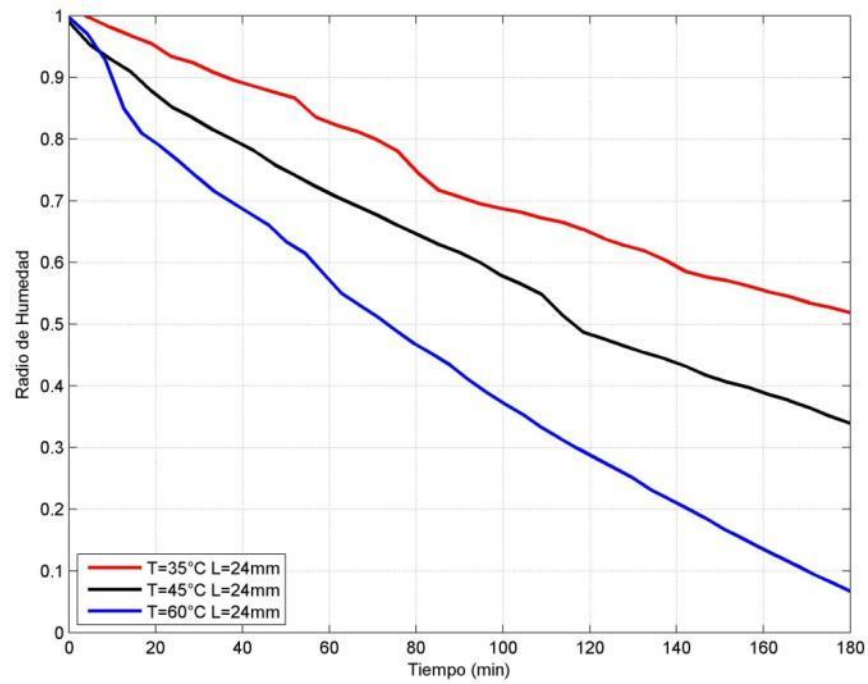


Figura 58. Perfil de humedad para longitud de fibra constante ($L=24\text{ mm}$).

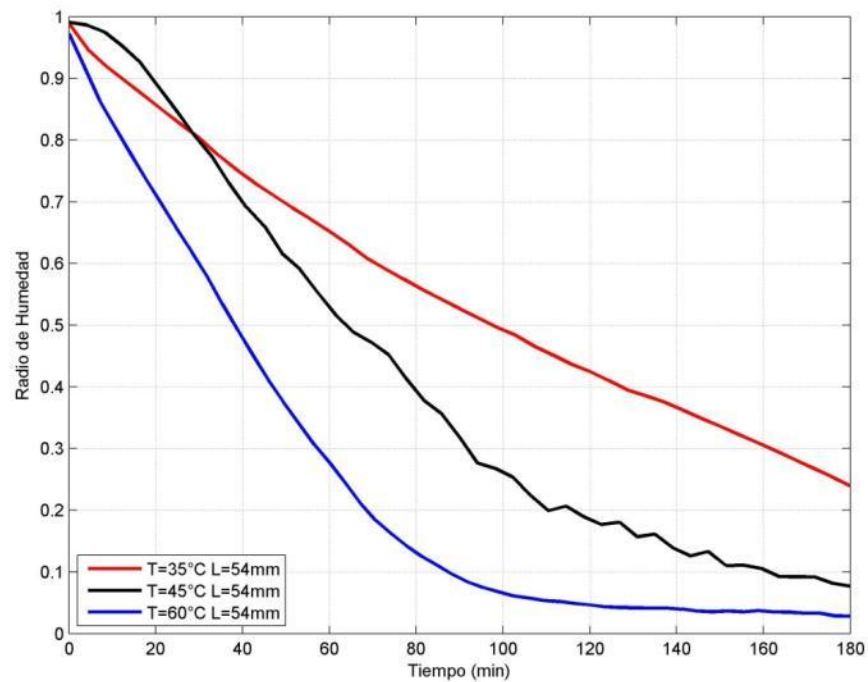


Figura 59. Perfil de humedad para longitud de fibra constante ($L=54\text{ mm}$).

4.2.2 Influencia de la Temperatura

En el análisis de la influencia de la temperatura en la cinética de secado, se evidencia la influencia que tiene el tamaño de la fibra en la cinética de secado y la humedad final. Como se puede observar existe una marcada diferencia en el comportamiento de la curva de secado para la longitud $L=6$ mm con respecto de los otros dos tamaños. Otra característica importante que se observa en la Figura 62, es que la humedad final para las longitudes de fibra $L=24$ mm y $L=54$ mm no presenta variaciones significativas.

Se observa que la única prueba que alcanzó la humedad de equilibrio fue la combinación $T=60$ °C y $L=54$ mm, en donde se alcanza una humedad muy cercana a la humedad final en un tiempo $t=120$ min, lo cual corresponde a tres cuartas partes del tiempo total del experimento. Este dato es importante dado que nos permite determinar la viabilidad de realizar el secado de varios lotes el mismo día. Con lo cual se podría lograr una disminución significativa del tamaño de la unidad de secado en campo.

Por último en las Figuras 60 y 61, se observa la marcada influencia que posee el tamaño de fibra en la cinética de secado, aunque en ninguno de los casos mostrados se alcanza la humedad de equilibrio.

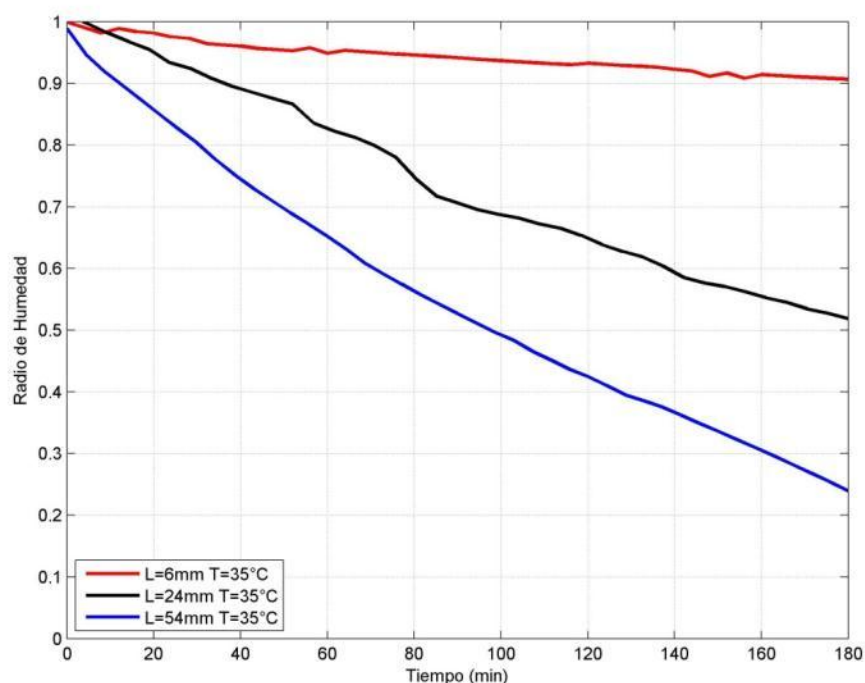


Figura 60. Perfil de humedad para temperatura constante $T=35$ °C

Lo anterior está de acuerdo con los resultados obtenidos por Mazutti et al. [42] en donde se puede observar correspondencia entre las curvas de secado obtenidas. Por otra parte los resultados presentados por Sosa – Arnao et al. [43] difieren

considerablemente de los obtenidos en el presente trabajo, dado que en estos trabajos se citan disminuciones relativamente bajas de la humedad final promedio de la muestra, alcanzándose en términos generales humedades por encima de 35% b.h.

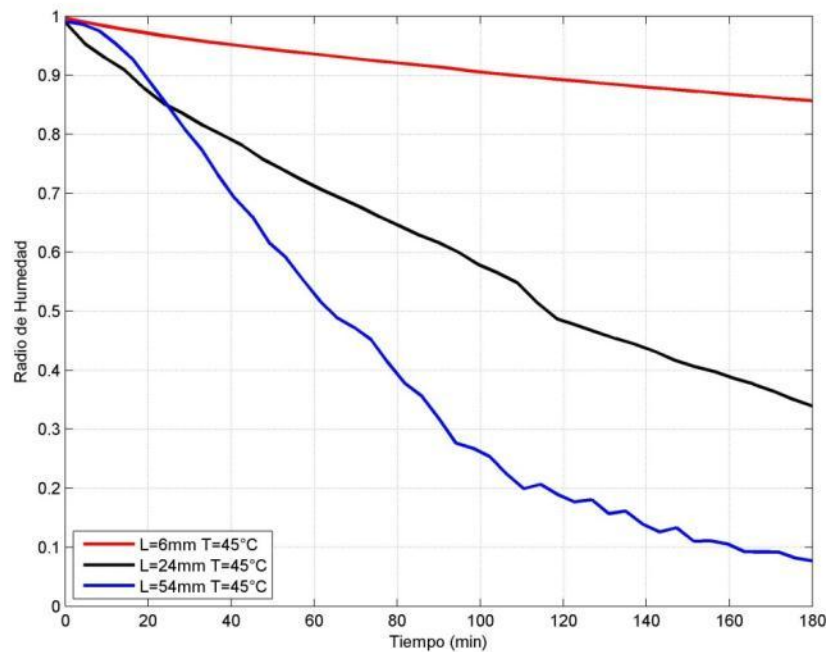


Figura 61. Perfil de humedad para longitud de fibra constante y $T=45^{\circ}\text{C}$.

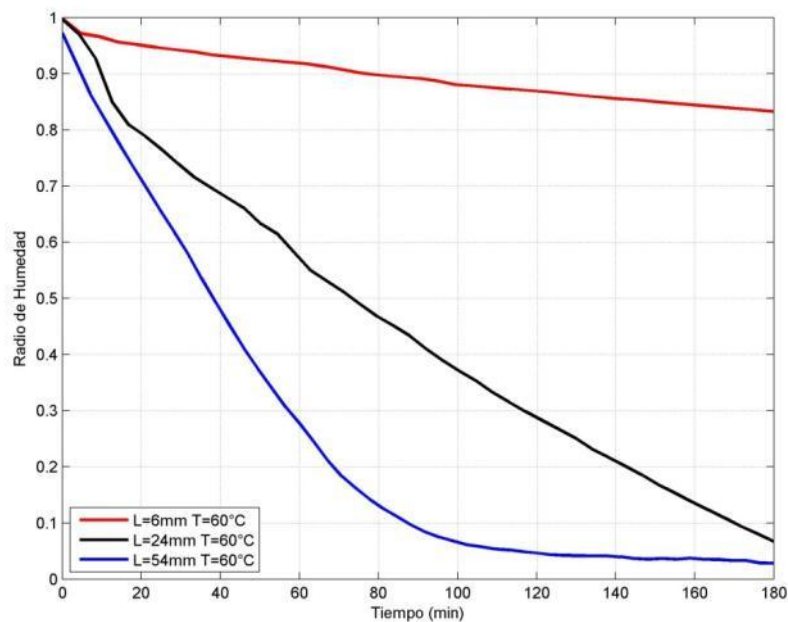


Figura 62. Perfil de humedad para longitud de fibra constante y $T=60^{\circ}\text{C}$.

4.3 Consumo Energético

El consumo de energía específico del proceso de secado se determina a partir de la cantidad de energía requerida para evaporar un kilogramo de agua de la mezcla. La cantidad de energía usada en el proceso de secado se estima calculando la potencia entregada por la resistencia eléctrica, la cuál es la energía que se requiere para calentar el flujo másico⁶ $0,079 \text{ kg/s}$, de 17°C (temperatura media de la ciudad de Bogotá correspondientes a horario laboral) a la temperatura media de secado (35 , 45 y 60°C) y dividiéndolo en la variación de masa (humedad extraída durante el proceso de secado).

Como se puede observar en la Figura 63, si bien los mejores resultados del proceso de secado se obtuvieron con la combinación $T=60^\circ\text{C}$ y $L=54 \text{ mm}$, combinación con la que se consiguió una humedad cercana al $2\% \text{ b.h.}$, la combinación $T=35^\circ\text{C}$ $L=54 \text{ mm}$ presenta una mayor eficiencia térmica al presentar un consumo específico de energía de aproximadamente la mitad.

Si bien los resultados obtenidos para energía específica consumida son considerablemente mayores que la presentada en la bibliografía, esto se puede deber a las diferencias existentes en las condiciones de secado, ya que los resultados presentes en la bibliografía corresponden a temperaturas del medio de secado superior a 150°C . Adicional a esto, la bibliografía trabaja con unidades de secado industriales, con características de hermeticidad y aislamiento superiores a las alcanzadas en la unidad experimental empleada en este estudio.

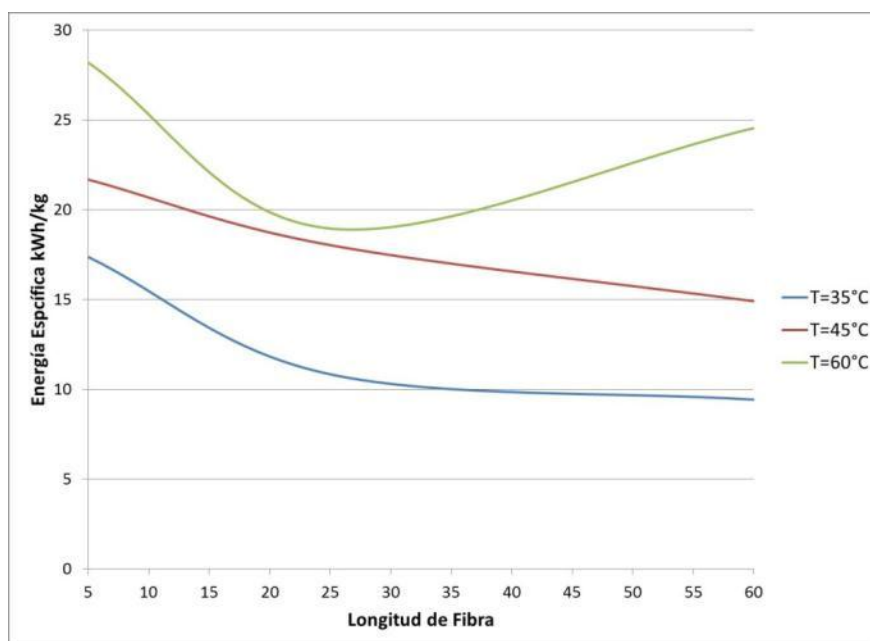


Figura 63. Curvas de consumo de energía por kilogramo de agua evaporada.

⁶ El cálculo de la potencia se llevó a cabo con un flujo másico promedio calculado en el capítulo 3.

5 CONTRASTE DE MODELOS EXISTENTES

5.1 Revisión de Modelos

En este Capítulo se presenta el desarrollo de algunos de los modelos matemáticos que fueron presentados en la Sección 2.9. Se seleccionaron un total de cuatro modelos, empleados con frecuencia en el estudio de secado de material biológico. El primero de estos modelos es adecuado para el fenómeno de secado en lecho profundo, mientras que los otros tres son desarrollados para capa delgada. Cada modelo fue resuelto teniendo en cuenta tanto parámetros encontrados en la literatura, como valores obtenidos experimentalmente por medio de la presente investigación. Adicional a esto, se realizan varias suposiciones con el fin de simplificar la solución de los modelos. El modelo de Chauhan se seleccionó debido a que es uno de los pocos modelos válido para el estudio de la cinética de secado en pila. Los tres modelos restantes son seleccionados, debido a su uso frecuente en el estudio del secado de diversos materiales biológicos; aunque se advierte que fueron concebidos para una condición de secado en capa fina de la biomasa.

Como el experimento se llevó a cabo de tal forma que el tiempo de secado era el mismo para cada caso, la variable no controlada que interesa estudiar es la humedad final. Dado que el prototipo experimental arroja como resultado la variación de masa en la cámara de secado, es necesario recurrir a un tratamiento previo a la hora de realizar el análisis de los resultados. Para ello, se recurre a (5-1) [76], la cual relaciona la variación de peso con la variación de humedad.

$$m_w = m_i \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2} \quad (5-1)$$

Una vez determinada la humedad al final del proceso de secado, con el fin de facilitar la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente se determina la relación adimensional, denominada relación de humedad MR, la cual se determina a partir de (5-2) [42].

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (5-2)$$

En la ecuación anterior se omite el valor de humedad de equilibrio M_e , debido a que este valor se aproxima a cero. En esta etapa del análisis experimental se tomaron los datos de temperatura, humedad relativa y la humedad del material, y se contrastaron con los datos arrojados por diversos modelos.

5.2 Solución de los Modelos

Los modelos de Chauhan y de Luikov, se solucionaron por el método de diferencias finitas. Para este caso las variables temporales se discretizaron con una diferencias finitas hacia atrás, mientras que las variables dimensionales se discretizaron con diferencias finitas centradas. Finalmente, las condiciones de

frontera en $x=L$ se discretizaron con diferencias finitas hacia adelante. Los valores de propiedades fueron tomados de la literatura [79].

5.3 Limitaciones del Modelado

Una de las principales limitaciones del contraste, es la falta de datos experimentales del perfil de humedad de la muestra de biomasa dentro de la cámara de secado, producto a la complejidad de medir la humedad de un sólido de forma instantánea, que permita verificar la exactitud de los resultados teóricos obtenidos para el modelo específico. De esta forma en el presente documento se presentarán las curvas de temperatura y humedad de la muestra para cada uno de los modelos estudiados; sin embargo, se presentarán únicamente el contraste de los valores de temperatura. Por otra parte, debido a la falta de información existente en la bibliografía especializada, es necesario determinar experimentalmente el calor específico del bagazo de caña. Al procedimiento y los resultados se le dedica la Sección 5.6, siendo el calor específico determinado para varios niveles de humedad del bagazo de caña de azúcar.

5.4 Modelo de Chauhan para lecho profundo

El modelo de Chauhan se desarrolló con el objetivo de determinar la cinética de secado de un material granulado en lecho fijo. Este modelo contempla las condiciones del medio de secado y del material a ser secado. Las ecuaciones que dominan el secado son presentadas por Chauhan et al. [56]. Las propiedades usadas en el desarrollo del modelo matemático se muestran en la Tabla 27. Los perfiles de temperatura y humedad obtenidos a través de este modelo se presentan en la Figuras 65 y 66. Se realiza una superposición de los resultados teóricos alcanzados con el modelo de Chauhan y los datos medidos experimentalmente.

$$\rho_f \epsilon_{GB} (C_f + C_v \lambda) \frac{\partial T_f}{\partial t} + G_{GB} (C_f + C_v \lambda) \frac{\partial T_f}{\partial x} = h_{vGR} (T_{GR} - T_f) \quad (5-3)$$

$$\rho_{GR} (C_{GR} + C_w M_t) \frac{dT_{GR}}{dt} + h_{fg} G_{GR} \frac{d\lambda}{dx} = h_{vGR} (T_f - T_{GR}) \quad (5-4)$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = -\frac{\rho_{GR}}{G_{GB}} \frac{dM_t}{dT} \quad (5-5)$$

$$\frac{dM_t}{dt} = -K (M_t - M_e) \quad (5-6)$$

Las ecuaciones (5-3) y (5-4) representan los balances de energía del producto y del medio de secado, (5-5) representa la variación de las condiciones del medio de secado, finalmente (5-6) representa la variación de la humedad de la muestra.

Tabla 27. Resumen de propiedades para el modelo de Chauhan.

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad de bagazo [9]	kg/m ³	120,1
Conductividad térmica [80]	W/m ² K	161
Calor específico promedio [81]	kJ/kg K	2.968

5.4.1 Condiciones de Inicio

Las condiciones iniciales y de frontera se plantean considerando las variables ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. De otra parte, como se observa en la Sección 3.6.1, la humedad inicial de la fibra es 50%.

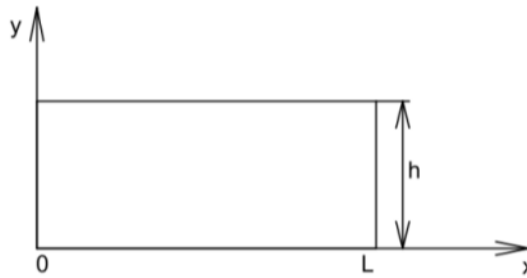


Figura 64. Esquema para el modelamiento matemático.

$$T = T_0; \quad t = t_0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (5-7)$$

$$M = M_0; \quad t = t_0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (5-8)$$

5.4.2 Condiciones de Frontera

$$T = T_\infty, \quad t > t_0, \quad x = 0 \quad (5-9)$$

$$M = M_e, \quad t > t_0, \quad x = 0 \quad (5-10)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_f - T), \quad t > t_0, \quad x = L \quad (5-11)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} = h_w(M_f - M), \quad t > t_0, \quad x = L \quad (5-12)$$

5.4.3 Principales Suposiciones

Debido a que el proceso de secado se lleva a cabo a presión atmosférica, el medio de secado se asume como gas ideal. El valor de la humedad de equilibrio se asumió constante con el fin de simplificar la solución del modelo, dicho valor fue definido en el mismo orden de magnitud del presentado en la literatura [56]. El coeficiente de transferencia de masa, fue determinado a partir de las ecuaciones de transferencia de masa en pared vertical [48].

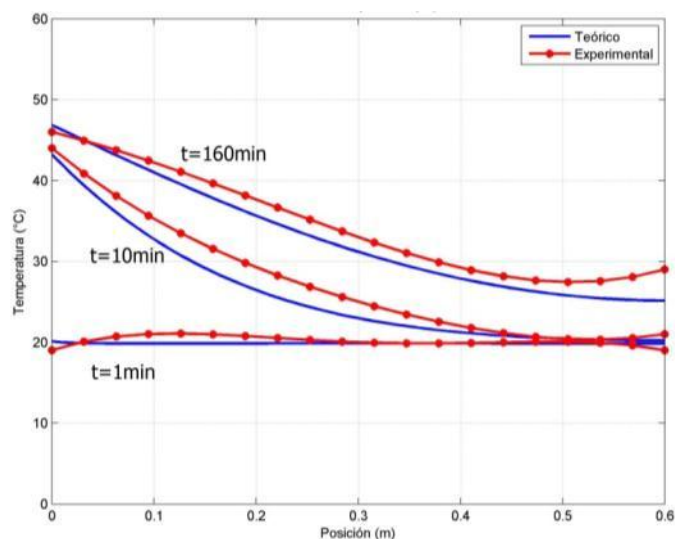


Figura 65. Comparación entre los perfiles de temperatura experimentales y mediante el modelo de Chauhan.

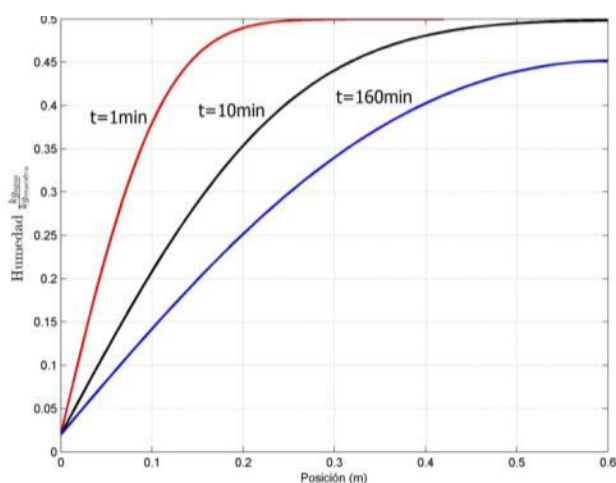


Figura 66. Perfil de humedad dentro de la cámara de secado.

5.5 Modelos para Capa Delgada

Existen otros modelos para la determinación de la cinética de secado de material biológico, que aunque concebidos para modelar el secado en capa delgada, pueden ser empleados para contrastar los comportamientos obtenidos experimentalmente en la presente investigación. Entre los modelos más usados se tienen el de Newton, el de Henderson Pabis y el de Luikov. Estos modelos para capa delgada son solucionados y empleados a continuación únicamente para realizar una comparación cualitativa del comportamiento del secado.

5.5.1 Modelo de Luikov Modificado

El modelo de Luikov modificado es uno de los principales modelos fenomenológicos presente en la bibliografía especializada. Dicho modelo ha sido usado para el estudio de diversos materiales. Las ecuaciones que dominan el modelo fueron usadas por Wu et al. [47]. Las principales propiedades empleadas en la solución se presentan en la Tabla 28. Los perfiles de temperatura y humedad obtenidos se muestran en las Figuras 67 y 68.

$$C_q \frac{\partial T}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 T + K_{12} \nabla^2 M_a + K_{13} \nabla^2 P \quad (5-13)$$

$$C_m \frac{\partial M_a}{\partial t} = K_{21} \nabla^2 T + K_{22} \nabla^2 M_a + K_{23} \nabla^2 P \quad (5-14)$$

$$C_p \frac{\partial P}{\partial t} = K_{31} \nabla^2 T + K_{32} \nabla^2 M_a + K_{33} \nabla^2 P \quad (5-15)$$

Tabla 28. Propiedades para el modelo de Luikov Modificado.

Variable	Unidades	Valor
Densidad de bagazo [9]	kg/m ³	120,1
Conductividad térmica [80]	W/m ² K	161
Calor específico promedio [81]	kJ/kg K	2.968

Condiciones de Inicio

El esquema del modelo puede apreciarse en la Figura 64, siendo similar al empleado en el anterior modelo. Las condiciones se definen como sigue,

$$T = T_0; \quad t = t_0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (5-16)$$

$$M = M_0; \quad t = t_0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (5-17)$$

Condiciones de Frontera

$$T = T_\infty, \quad t > t_0, \quad x = 0 \quad (5-18)$$

$$M = M_e, \quad t > t_0, \quad x = 0 \quad (5-19)$$

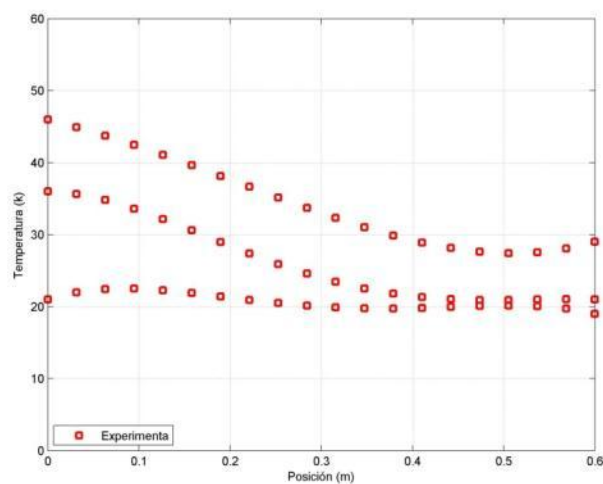
$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_f - T), \quad t > t_0, \quad x = L \quad (5-20)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} = h_w(M_f - M), \quad t > t_0, \quad x = L \quad (5-21)$$

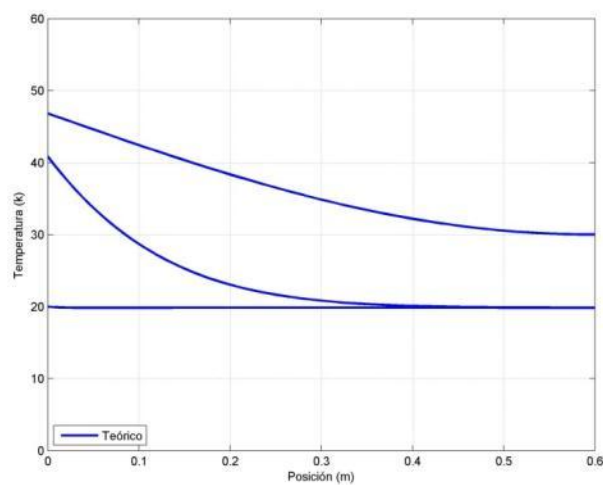
Principales Suposiciones

Dado que el diseño experimental no contempla la medición de caídas de presión dentro de la cámara de secado, esta variable no fue tomada en cuenta en la discretización. De esta forma el sistema de ecuaciones queda reducido a un

sistema de ecuaciones dos por dos. Al igual que en el modelo de transferencia de calor y masa, se presenta la temperatura y la humedad de la muestra al interior de la cámara de secado. Aunque sólo se lleva a cabo la comparación cualitativa del perfil de temperatura.



(a)



(b)

Figura 67. Comparación entre los perfiles de temperatura experimentales (a) y mediante el modelo de Luikov Modificado (b).

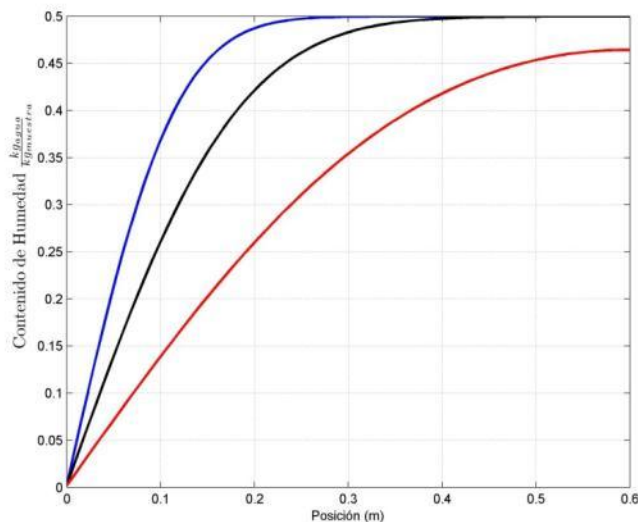


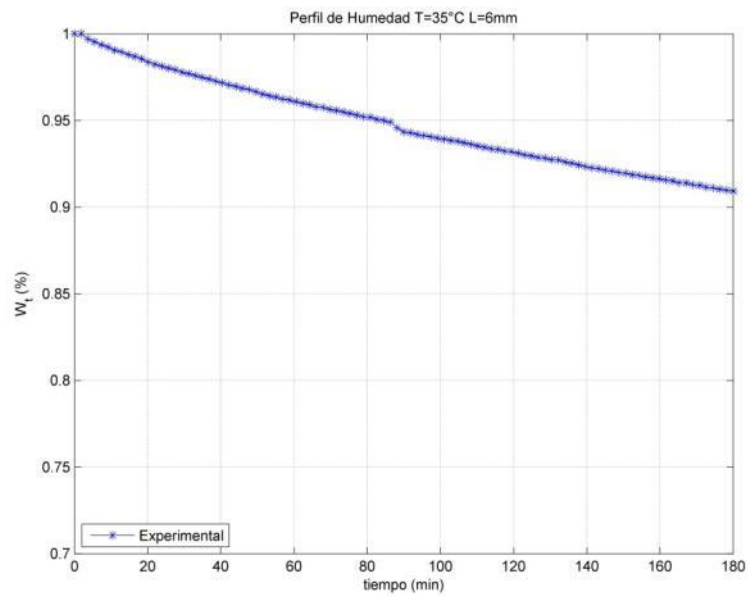
Figura 68. Variación de la humedad de la muestra, modelo Luikov Modificado.

5.5.2 Modelo de Newton

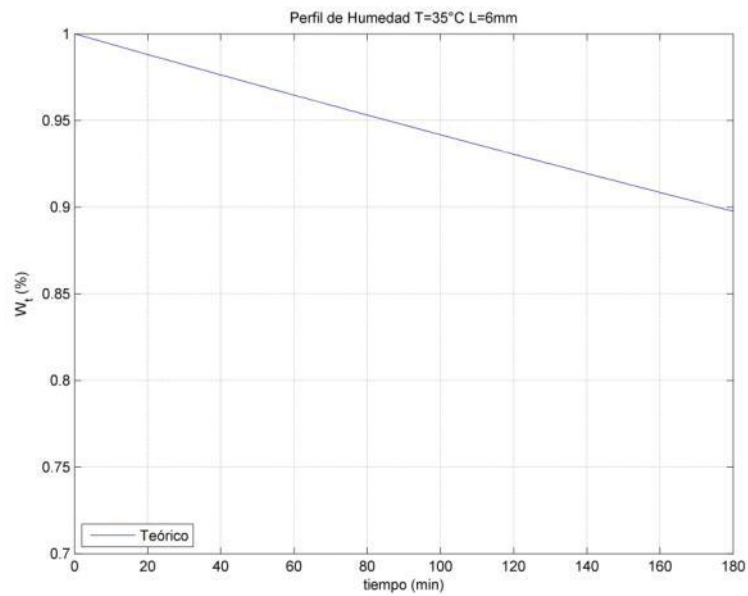
El modelo de Newton es el modelo de capa delgada más simple, dado que involucra una variable adimensional. En la Tabla 29 se presentan los valores de la constante K usada para cada caso, y en las Figuras 69 a 71 se presentan los contrastes cualitativos con los resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 29. Aproximación de resultados experimentales al modelo de Newton.

Combinación	K
$T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}; L=6\text{ mm}$	0,00060
$T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}; L=24\text{ mm}$	0,00085
$T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}; L=54\text{ mm}$	0,00090

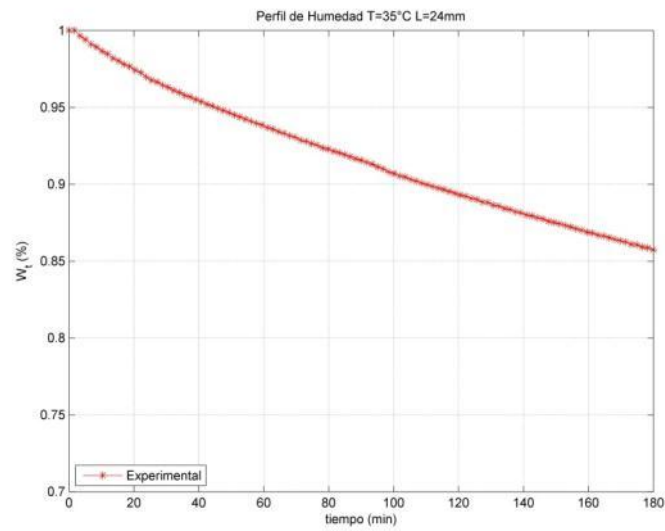


(a)

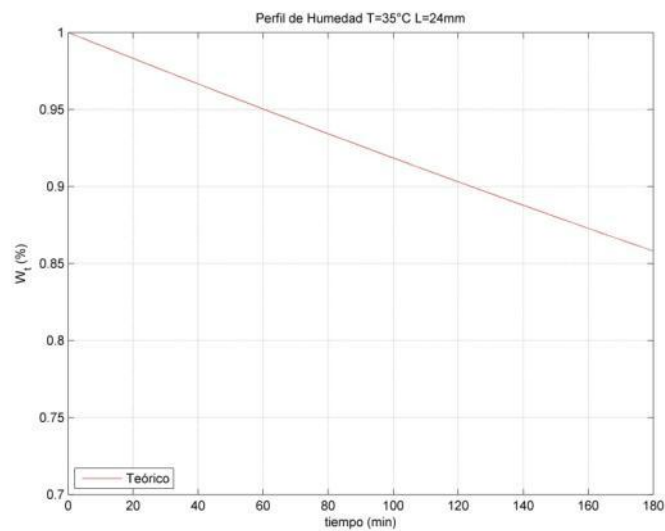


(b)

Figura 69. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{ mm}$.

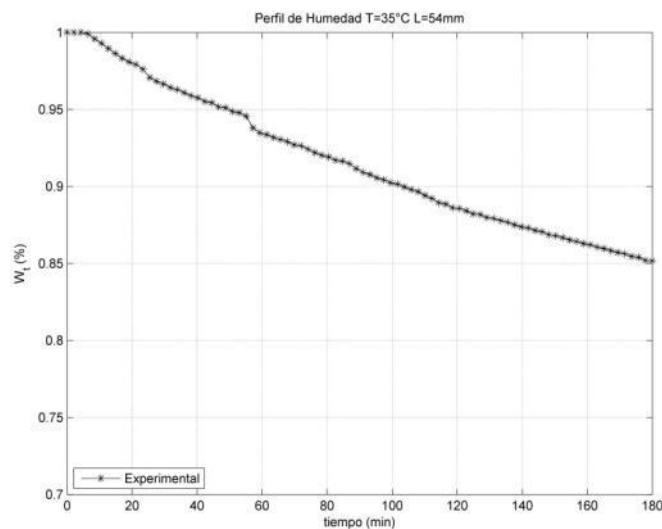


(a)

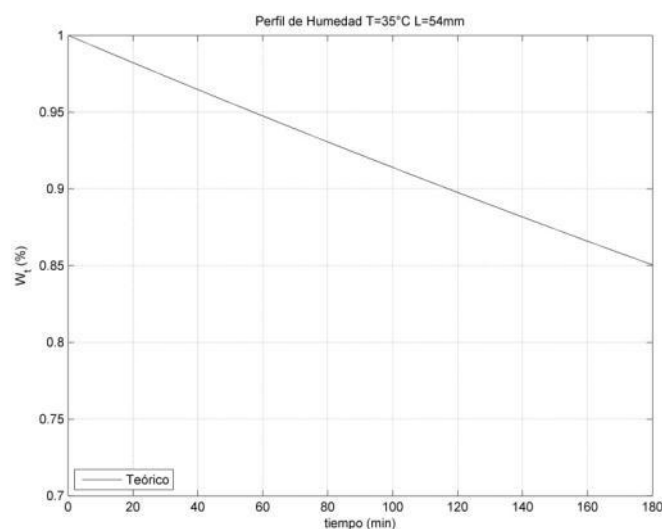


(b)

Figura 70. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{ mm}$.



(a)



(b)

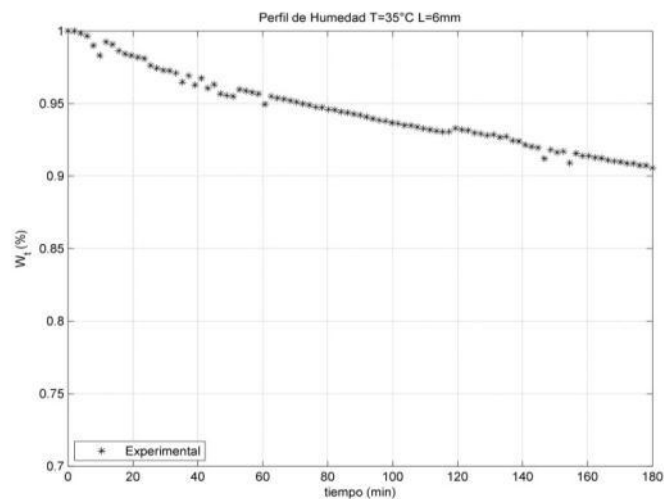
Figura 71. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Newton (b) para las condiciones $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{ mm}$.

5.5.3 Modelo de Henderson Pabis

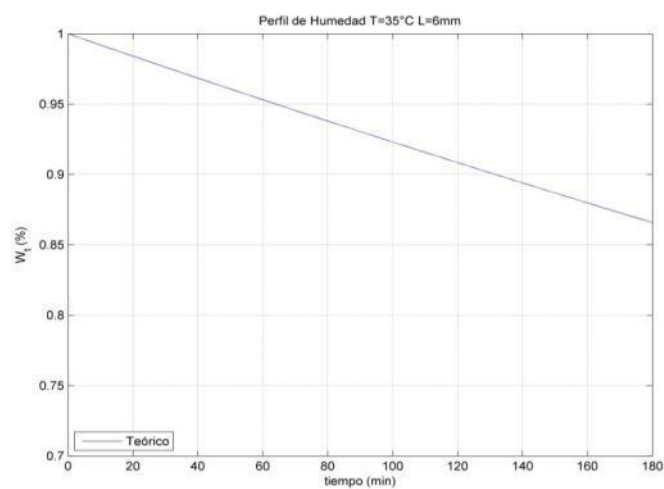
El modelo de Henderson Pabis, es otro modelo usualmente empleado que depende de dos factores adimensionales. En la Tabla 30 se muestran las constantes usadas en la solución del modelo. En las Figuras 72 a 74 se presentan los resultados obtenidos por medio experimental y por medio del modelo de Henderson Pabis.

Tabla 30. Constantes adimensionales para el modelo de Henderson Pabis.

Combinación	K1	K2
T = 35 °C; L=6 mm	0,0008	0,0008
T = 35 °C; L=24 mm	0,0032	0,0032
T = 35 °C; L=54 mm	0,0072	0,0073

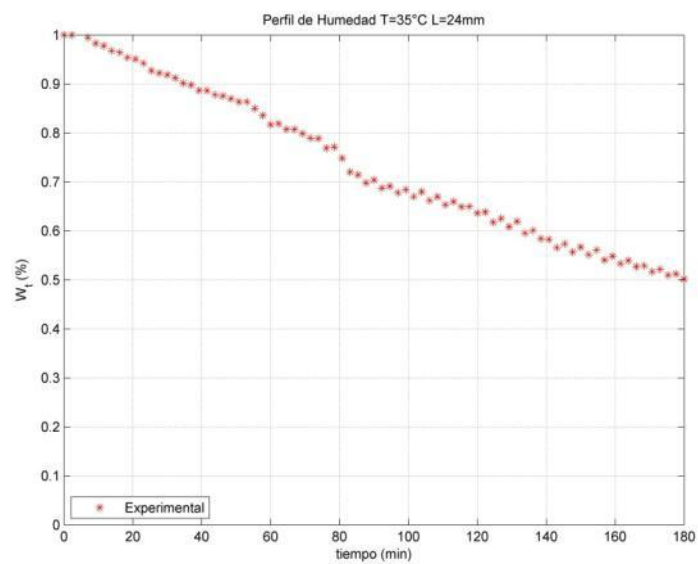


(a)

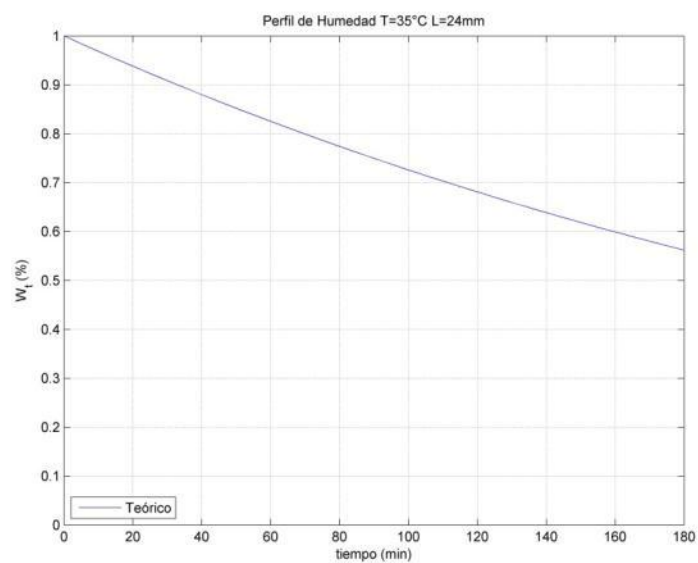


(b)

Figura 72. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones T=35 °C y L=6 mm.

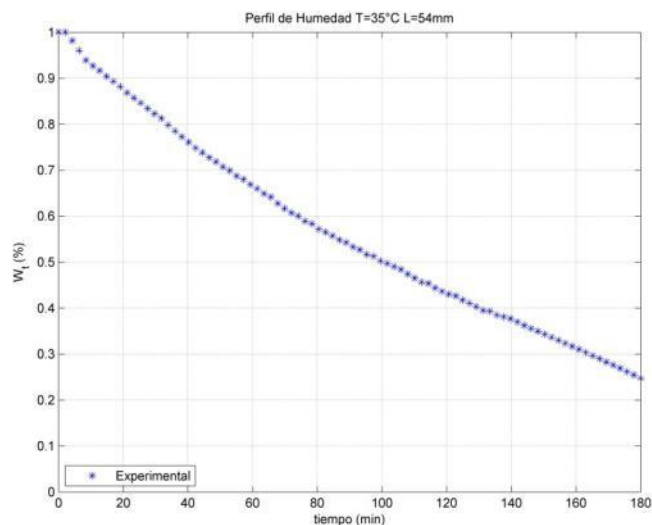


(a)

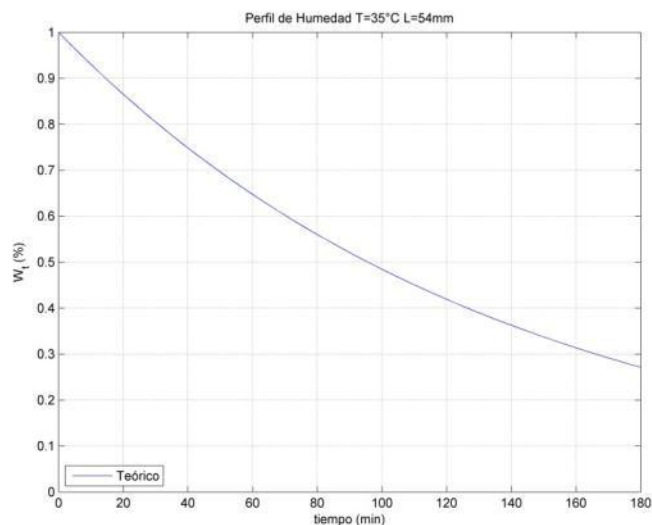


(b)

Figura 73. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{ mm}$.



(a)



(b)

Figura 74. Contraste entre los resultados experimentales (a) y el modelo de Henderson Pabis (b) para las condiciones T=35 °C y L=54 mm.

5.6 Medición del calor específico del Bagazo de Caña

Dentro del proceso de estudio de secado de bagazo de caña panelera, se llevó a cabo la medición de la influencia de la humedad en el calor específico del bagazo de caña. Para ello se tomaron tres muestras con valores de humedad diferentes (12,5%, 30% y 50% en b.h.). El método empleado fue el de Calorimetría Diferencial de Barrido Modulada (DSC). En las Figuras 75 a 78 se muestran algunas de las gráficas arrojadas por el equipo. Como se observa, en el rango de temperaturas establecido para el experimento (entre 0 y 60°C) no se presentan

variaciones significativas de la magnitud del calor específico con la temperatura, como se puede apreciar en las curvas mostradas a continuación.

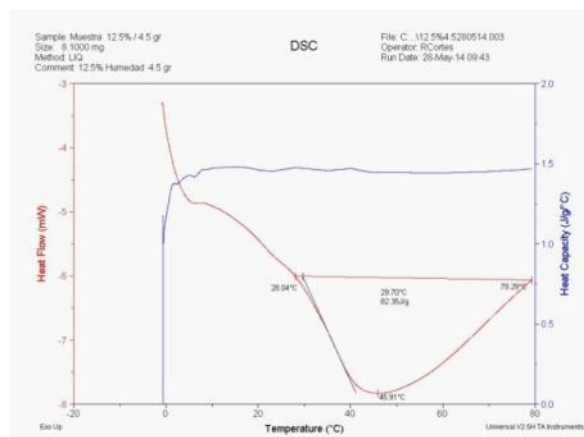


Figura 75. Curva de calor específico para Humedad = 12.5%

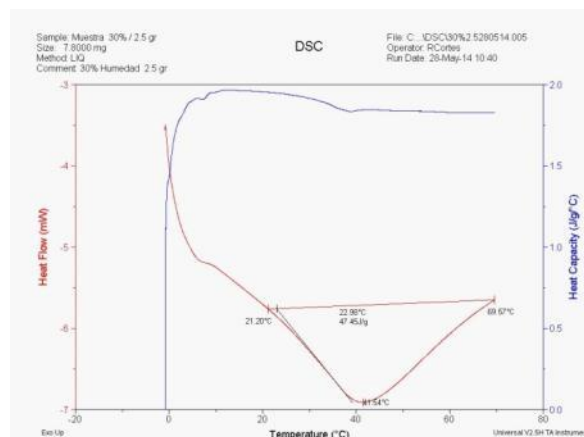


Figura 77. Curva de calor específico para Humedad = 30%

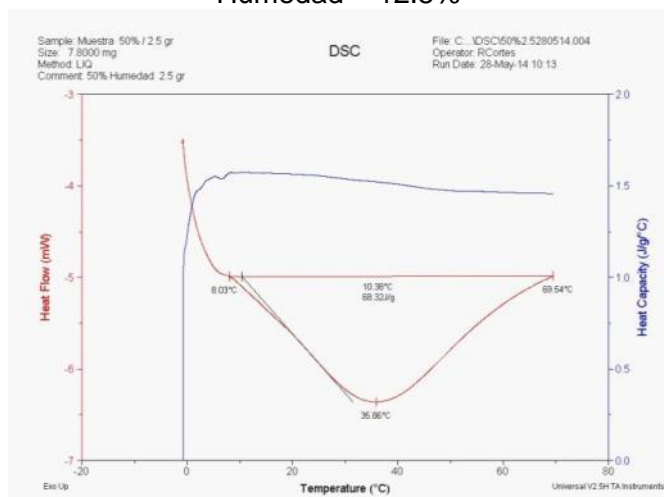


Figura 76. Curva de calor específico para Humedad = 50%

En cuanto a la influencia de la humedad, se observa que el calor específico tiende a disminuir a medida que la humedad aumenta. De esta forma, para el caso de la humedad del 12,5% se tiene un calor específico promedio de 3,389 kJ/kg K, mientras que para una humedad del 30% se tiene un calor específico promedio de 2,988 kJ/kg K; estos valores son similares a los encontrados en la bibliografía especializada. Por último, para una humedad de 50% se tiene un promedio de calor específico de 1,919 kJ/kg K. Esta influencia presenta una dependencia lineal con respecto a la humedad, tal como se observa en la Figura 78. En la resolución de los modelos presentes en este capítulo se usa el valor de calor específico promedio encontrada para la humedad del 30%, dado que es el encontrado además en la bibliografía especializada.

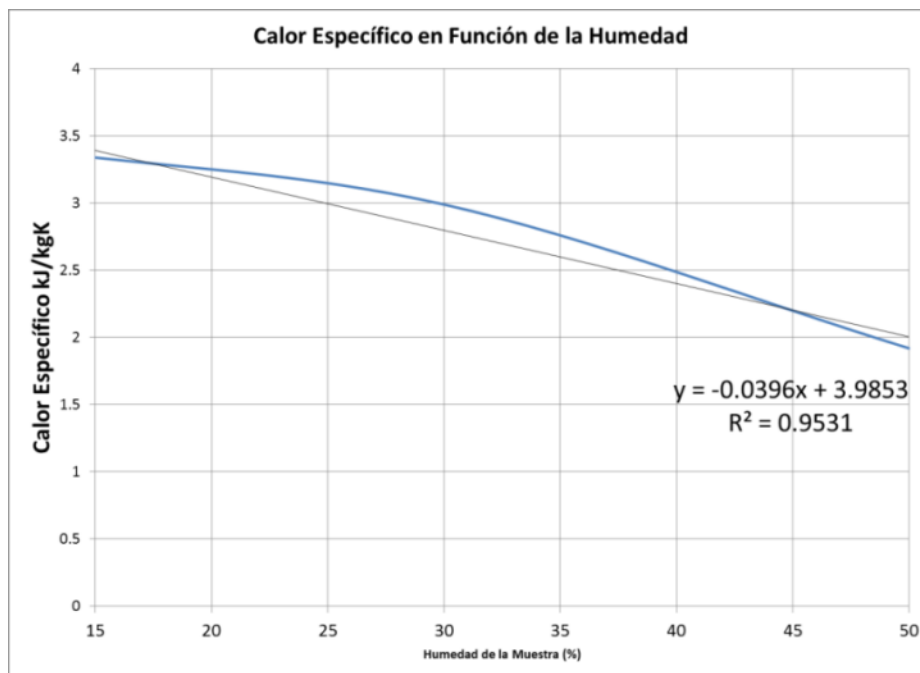


Figura 78. Influencia de la humedad en el calor específico de la muestra.

5.7 Discusión Sobre los Resultados Experimentales Obtenidos en la Presente Investigación y por otros Investigadores

Como se mostrará a continuación, los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con los obtenidos por otros autores. Por ejemplo, las relaciones de humedad final que se obtuvieron en el presente trabajo, coinciden en la mayoría de los casos, con excepción de aquellas en las que el tamaño de fibra influye en el proceso de secado (longitud de fibra menor a 24 mm). Esto se debe a que en el estudio llevado a cabo por Mazutti et al. [42] el proceso de secado se llevó a cabo en capa delgada, lo cual es independiente del tamaño de la partícula. Los perfiles se muestran en la Figura 79.

Por otra parte, los resultados de humedad final también se encuentran cerca de algunos de los trabajos referenciados en la revisión del estado del Arte (ver Capítulo 2). Sin embargo, industrialmente los procesos normalmente no alcanzan humedades tan bajas. De esta forma Sosa – Arnao et al. [43] presentan una revisión de investigaciones y aplicaciones de secado de bagazo de caña, donde se alcanzan humedades finales promedio superiores a 35% b.h.

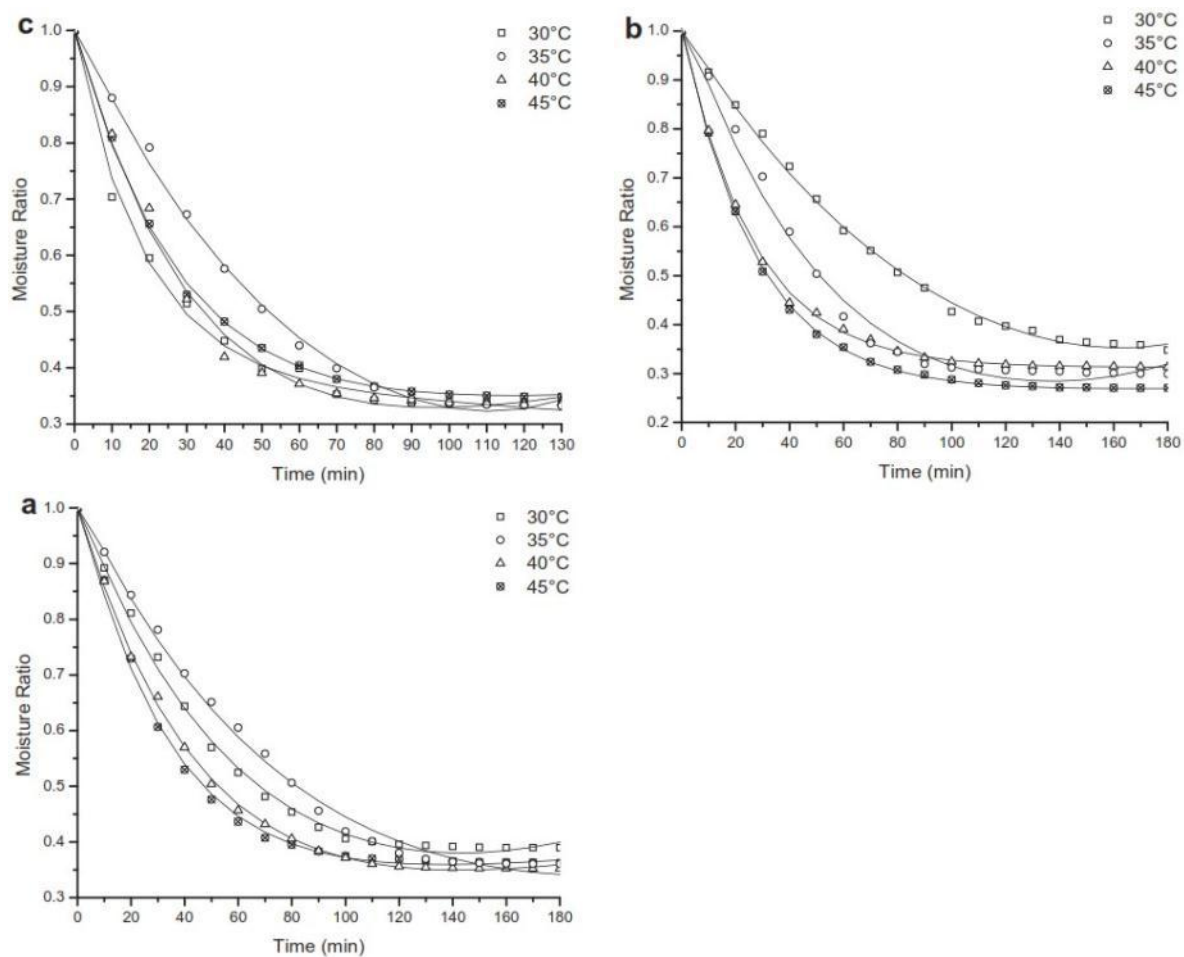


Figura 79. Perfiles de secado. Tomado de [42].

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

El estudio de la cinética de secado de diversos materiales (en especial aquellos vitales para los sistemas productivos regionales) bajo diversas condiciones y mediante el uso de diferentes tecnologías de secado, se constituye como punto de partida para el desarrollo de modelos unificados de predicción de la cinética de secado.

Los modelos estadísticos experimentales obtenidos en el presente trabajo presentan una buena relación con los resultados reportados por otros autores. Lo anterior se puede visualizar en la Sección 5.10, donde se aprecia que existe una concordancia aceptable en las cinéticas de secado obtenidas en el presente estudio y las presentes en la bibliografía especializada. Por otra parte, los resultados de humedad final también se encuentran cerca a los presentados en la bibliografía. Sin embargo, industrialmente los procesos normalmente no alcanzan humedades tan bajas. De esta forma Sosa – Arnao et al. [43] presentan una revisión de investigaciones y aplicaciones de secado de bagazo de caña las cuales alcanzan humedades finales promedio superiores a 35% b.h. Sin embargo, es necesario anotar que estos modelos presentan resultados coherentes bajo un rango de condiciones estrecho; lo anterior debido a que para pequeñas variaciones de los parámetros de entrada, ocurren variaciones significativas en la información de salida.

Desde el comienzo de este estudio se contempló el desarrollo de la unidad experimental para tal fin, dado que no se contaba con una unidad experimental que se adecuara a las condiciones requeridas para el desarrollo de la presente investigación. De esta forma se desarrolló el proceso de diseño y construcción de una unidad experimental, la cual cuenta con una precisión adecuada para este tipo de pruebas, contando con una resolución estrecha; por ejemplo, $\pm 1\text{g}$ para peso, $\pm 2^\circ\text{C}$ para temperatura y $\pm 5\%$ HR. Adicional a esto cuenta con un tiempo de muestreo adecuado para el fenómeno en estudio ($\Delta t = 1\text{ s}$). Lo anterior permite registrar las variaciones de las variables experimentales con una frecuencia de 1Hz, lo cual es adecuado para el estudio de la cinética de secado convectivo en lecho fijo, la cual se desarrolla durante periodos de tiempo largos.

A la luz de los resultados obtenidos se puede afirmar que es posible obtener resultados de humedad final del proceso de secado del bagazo de caña panelera usando equipos de baja temperatura y potencia de operación, lo cual conllevaría a contar con una biomasa con un contenido de humedad viable para el proceso de combustión que se lleva a cabo en las hornillas de los trapiches. Adicionalmente, se visualiza la posibilidad de implementación de secadores tecnológicamente simples, con costos de instalación y mantenimiento relativamente bajos. Como se observa en los resultados obtenidos, con temperaturas que oscilan entre 35 y 60°C; y longitudes de fibra entre 24 y 54 mm respectivamente, se pueden alcanzar

humedades finales adecuadas, tanto para el proceso de combustión como para la densificación de esta biomasa con fines de almacenamiento o comercialización. Aunque, si el bagazo panelero es requerido para un proceso de densificación por presión mecánica con una humedad final que oscile entre 10 – 20% b.h., no se recomienda usar temperaturas de secado por debajo de 45°C y longitudes de fibra menores a 24 mm.

Es posible aumentar la eficiencia del proceso de secado, controlando el contacto del medio de secado con el material, el cual de acuerdo con los resultados obtenidos es el principal factor que influye en la cinética de secado. De esta forma, cuando el tamaño de la fibra es menor a 24 mm, el material procesado dificulta el flujo del aire a través del lecho de secado; esto a su vez ocasiona una reducción importante en la eficiencia de secado. Lo anterior se evidencia en las gráficas de humedad final, en las cuales se muestran diferencias significativas en la humedad final para tamaño de fibra $L = 6$ mm con respecto a los otros dos niveles de longitud de fibra.

Otra característica importante que se observa, es que el tamaño de fibra tiene una mayor influencia, respecto al factor temperatura de secado, sobre la humedad final de la muestra. Dicho comportamiento puede ser atribuido a la baja presión generada por el ventilador axial, lo cual ocasiona un menor flujo de aire entre las fibras para longitudes menores. De la misma forma, las gráficas obtenidas para la humedad final en función de la temperatura y la longitud de fibra, evidencian que la influencia de la temperatura sobre la humedad final tiende a ser lineal, mientras que la influencia de la longitud de fibra se adecúa mejor a un comportamiento cuadrático.

Para una temperatura de 60°C y una longitud de fibra de 54 mm, se observa una tasa de secado alta, dado que se obtiene la humedad final en un tiempo de 120 min. Lo que corresponde a $\frac{3}{4}$ de tiempo estimado para el experimento. Sin embargo, la humedad final alcanzada es similar a la que presenta para combinaciones de temperatura y longitud de fibra de 45°C y 54 mm y también para 60°C y 24 mm. Esto se comprueba con la prueba de t de Student, en donde se evidencia que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los valores de humedad final para estos resultados.

Para la combinación de temperatura de 60°C y un tamaño de fibra de 54 mm, se observa una marcada tendencia a detenerse el proceso de secado al aproximarse la humedad de la muestra al 3% en base húmeda (humedad de equilibrio). Este mismo comportamiento se observa para una temperatura de 45°C y longitud de fibra de 54 mm, el cual tiende a estabilizarse alrededor de 8% de humedad (b.h.).

Si bien los mejores resultados del proceso de secado se obtuvieron con la combinación $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=54$ mm, con la cual se consiguió una humedad promedio cercana al 3% (b.h.), se tiene que para la combinación $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=54$ mm se

presenta una mayor eficiencia térmica, con un consumo específico de energía de aproximadamente la mitad.

Los resultados de esta investigación experimental pueden emplearse como punto de partida para el diseño y construcción de un secador piloto; dado que se observan resultados de secado óptimos en rangos de temperatura, flujos del medio de secado, humedad inicial de la biomasa y manipulación de esta última fáciles de implementar mediante tecnologías simples. Esto incluye la posibilidad de uso de la energía solar como fuente para calentar el medio de secado. Adicional a esto, el manejo de bajas temperaturas permite reducir los riesgos de combustión del material tratado. Otro elemento importante a tener en cuenta es que para el rango de temperaturas entre 35°C y 60°C, factible de alcanzar mediante tecnología de calentamiento solar de bajo costo, se obtiene una eficiencia del proceso de secado relativamente alta.

El presente estudio del secado de bagazo de caña en pila constituye un importante aporte para la comprensión de este proceso aplicado al sector rural. Dado que en la actualidad los estudios relacionados se centran fundamentalmente en otros mecanismos de secado, con tecnologías inadecuadas para el sector rural colombiano, debido principalmente al nivel de innovación tecnológica requerido, la complejidad constructiva, su mantenimiento y las características de operación de las mismas. De esta forma, los resultados obtenidos sobre la cinética del secado de bagazo de caña panelera en pila verifican la factibilidad de alcanzar humedades finales del bagazo de caña de azúcar panelera convenientes; y se constituyen en un avance significativo para en un futuro lograr escalar esta tecnología y hacerla llegar al consumidor agroindustrial final.

6.2 Trabajos Futuros

Un trabajo posterior que se podría llevar a cabo es adicionar un desecador a la entrada de la etapa de calentamiento. Esto con el fin de eliminar la humedad del medio de secado a la entrada como parámetro variable. De esta forma se garantizaría en mejor medida la repetibilidad de cada experimento.

Adelantar estudios del secado del bagazo tal como se obtiene del trapiche, con el fin de evaluar las ventajas que tiene durante el secado la reducción del tamaño de la fibra. Esto con el fin de evaluar qué tan conveniente es un pre-proceso del material.

Es posible modificar el flujo del medio de secado dentro del secador, de tal forma que sea posible comparar las pruebas de secado en flujos paralelos y flujos cruzados. Adicional a esto, se debe rediseñar el contenedor de la muestra, de tal forma que el flujo de aire tenga menos restricciones, dado que se presentó en algunas pruebas (con longitud de fibra = 6mm), una concentración excesiva de humedad.

Para obtener datos más fiables, sería conveniente desarrollar corridas experimentales *in situ*, dado que la humedad relativa del aire es un factor relevante en la cinética de secado. Dicha característica es importante si tenemos en cuenta que la humedad relativa en la ciudad de Bogotá D.C. es baja.

Es posible desarrollar otro código de adquisición de datos, el cuál permita realizar un muestreo con frecuencias superiores a 1Hz, el cual es el límite del sistema actual. Por otra parte, se puede mejorar el formato de adquisición de datos entregados por la balanza a través de un puerto serial.

Una forma de aumentar la eficiencia del proceso de secado en campo sería usar los gases de combustión generados durante los procesos de clarificación, encalado, evaporación y concentración, para mejorar la cinética de secado. Lo anterior considerando que en el ducto de salida de los gases de la combustión son usuales temperaturas superiores a los 400°C.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. F. Bombiono Matos, G. Roca Alarcon, and R. Lesme Jaén, “Perspectivas del secado de bagazo”, *Tecnol. Química*, vol. XXIII, pp. 75–79, 2003.
- [2] Fondo Nacional de la Panela, (2013, junio 22), “Estadísticas,” 2010. [Online]. Available: <http://www.fedepanela.org.co>.
- [3] M. del M. Ambiente, “Guía Ambiental para el Subsector Panelero”, 2002.
- [4] J. I. Reisman and P. M. Lemieux, “Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas”, 1997.
- [5] Fondo Nacional de la Panela, (2013, junio 22), “Importancia de la Panela,” 2012. [Online]. Available: <http://www.fedepanela.org.co>.
- [6] International Energy Agency, (2013, junio 22), “Estadísticas Energéticas,” 2012. [Online]. Available: <http://www.iea.org>.
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “PROGRAMA DE USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA Y FUENTES NO CONVENCIONALES – PROURE”, 2015.
- [8] Fondo Nacional de la Panela, (2013, junio 22), “Proceso de fabricación de la panela”, 2012. [Online]. Available: <http://www.fedepanela.org.co>.
- [9] R. V. Garcés Paz and S. V. Martinez Silva, “Estudio del poder calorífico de bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda”, Tesis, Departamento de Ing. Química, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [10] J. H. Rodríguez y P. Quinto Diez, “Secado de medios porosos : una revisión a las teorías actualmente en uso”, *Científica*, vol. 9, pp. 63–71, 2005.
- [11] F. L. Moreno, “Determinación de los parámetros para la simulación matemática del secado de almidón de yuca”, Tesis M.Sc. Dep. Ing. Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [12] A. S. Mujumdar and C. L. Law, “Drying Technology : Trends and Applications in Postharvest Processing”, *Food Bioprocess Technol*, vol. 3, pp. 843–852, 2010.
- [13] J. Cai and S. Chen, “Determination of Drying Kinetics for Biomass by Thermogravimetric Analysis under Nonisothermal Condition”, *Dry. Technol.*, vol. 26, pp. 1464–1468, 2010.
- [14] L. A. Hernández A., “Importancia energética y ambiental de la biomasa en Colombia”, *Agron. Colomb.*, vol. 11, pp. 228 – 235, 1994.
- [15] J. E. White, W. J. Catallo, and B. L. Legendre, “Biomass pyrolysis kinetics : A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies”, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, pp. 1–33, 2011.
- [16] M. Balat and G. Ayar, “Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends”, *Energy Sources*, vol. 27, pp. 37–41, 2006.
- [17] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), *Atlas de Biomasa Residual*. 2006, p. 180.
- [18] G. Osorio Cadavid, *Buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela*. Corpoica, 2007, p. 200.
- [19] B. R. Stanmore, “Generation of Energy from Sugarcane Bagasse by Thermal Treatment”, *Waste Biomass Valor*, vol. 1, pp. 77–89, 2010.

- [20] S. V Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, and T. J. Morgan, "An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass", *Fuel*, vol. 94, pp. 1–33, 2012.
- [21] S. V Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass", *Fuel*, vol. 89, pp. 913–933, 2010.
- [22] H. Holmberg, "Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an Industrial CHP Plant Improve the Energy Efficiency of An Industrial CHP Plant", Helsinki University of Technology, 2007.
- [23] H. Li, Q. Chen, X. Zhang, K. N. Finney, V. N. Sharifi, and J. Swithenbank, "Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 35, pp. 71–80, 2012.
- [24] P. F. Beltrán, J. B. C. Martínez, J. R. F. Veja, I. F. Acea, and A. S. Medina, "Los Residuos Agrícolas y Cañeros como Alternativa Energética del Presente y del Futuro", in *International Workshop Advances in Cleaner Production*, 2011, p. 11.
- [25] M. Gonzalez - Valadez, G. Munoz - Hernandez, and R. Sanchez - Lopez, "Design and evaluation of an extruder to convert crop residues to animal feed", *Biosyst. Eng.*, vol. 100, pp. 66–78, 2008.
- [26] S. Pang and A. S. Mujumdar, "Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant", *Dry. Technol.*, vol. 28, pp. 690–701, 2010.
- [27] E. C. Rada, M. Ragazzi, L. Fiori, and D. Antolini, "Bio-drying of grape marc and other biomass: a comparison", *Water Sci. Technol.*, vol. 60, pp. 1065–1071, 2009.
- [28] J. G. Brammer and A. V Bridgwater, "Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 3, pp. 243 – 289, 1999.
- [29] S. Pang and M. Dakin, "Drying Rate And Temperature Profile For Superheated Steam Vacuum Drying And Moist Air Drying of Softwood Lumber", *Dry. Technol.*, vol. 17, pp. 37–41, 2007.
- [30] M. Stahl, K. Granström, J. Berghel, and R. Renström, "Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets", *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, pp. 621–628, 2010.
- [31] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. M. Jr, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass", *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, pp. 17–46, 1998.
- [32] F. Mazzoli - Rocha, C. Bichara Magalhães, O. Malm, P. H. Nascimento Saldiva, W. Araujo Zin, and D. Souza Faffe, "Comparative respiratory toxicity of particles produced by traffic and sugar cane burning", *Enviromental Res.*, vol. 108, pp. 35–41, 2008.
- [33] F. Group, *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton. CRC Press. 2006, p. 1286.
- [34] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of solar drying technologies", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2652–2670, 2012.
- [35] K. S. Jairaj, S. P. Singh, and K. Srikant, "A review of solar dryers developed for grape drying", *Sol. Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1698–1712, 2009.

- [36] S. Chemkhi and F. Zagrouba, "Water diffusion coefficient in clay material from drying data", *Desalination*, vol. 185, pp. 491–498, 2005.
- [37] I. Montero, J. Blanco, T. Miranda, S. Rojas, and A. R. Celma, "Design , construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products", *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 7, pp. 1510–1521, 2010.
- [38] J. Srikiatden and J. S. Roberts, "Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity" *J. Food Eng.*, vol. 84, pp. 516–525, 2008.
- [39] E. Barati and J. A. Esfahani, "Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab", *Energy*, vol. 36, pp. 2294–2301, 2011.
- [40] M. A. M. Khraisheh, T. J. R. Cooper, and T. R. A. Magee, "Transport Mechanisms of moisture during air drying processes", *Inst. Chem. Eng.*, vol. 75, pp. 34 – 40, 1997.
- [41] P. Lerman and O. Wennberg, "Experimental method for designing a biomass bed dryer", *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. S31–S39, 2011.
- [42] M. A. Mazutti, G. Zabet, G. Boni, A. Skovronski, D. de Oliveira, M. Di Lucioano, J. V. Oliveira, M. I. Rodrigues, H. Treichel, and F. Maugeri, "Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse", *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, pp. 780–786, 2010.
- [43] J. H. Sosa-arnao, F. M. De Oliveira, J. L. G. Corrêa, M. A. Silva, and S. A. Nebra, "SUGAR CANE BAGASSE DRYING – A REVIEW", *Drying*, vol. B, pp. 990–997, 2004.
- [44] A. S. Mujumdar, "An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs," *Transp. Porous Media*, vol. 66, no. 1–2, pp. 3–18, Aug. 2006.
- [45] A. K. Datta, "Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations", vol. 80, pp. 80–95, 2007.
- [46] A. K. Datta, "Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results", *J. Food Eng.*, vol. 80, pp. 96–110, 2007.
- [47] Y. Wu and J. Irudayaraj, "Analysis of Heat , Mass and Pressure Transfer in Starch Based Food Systems", *J. Food Eng.*, vol. 29, pp. 399–414, 1996.
- [48] R. N. Pandey, S. K. Srivastava, and M. D. Mikhailov, "Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary porous bodies through matrix calculus: a new approach", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, pp. 2649 – 2660, 1999.
- [49] A. Bouddour, J. L. Auriolult, and M. Mhamdi-Alaoui, "Heat and mass transfer in wet porous media in presence of evaporation-condensation", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, pp. 2263–2277, 1998.
- [50] X. Dong Chen, "Moisture Diffusivity in Food and Biological Materials", *Dry. Technol.*, vol. 25, pp. 37–41, 2007.
- [51] H. Ni, A. K. Datta, and K. E. Torrance, "Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, pp. 1501–1512, 1999.

- [52] T. Bartzanas, D. D. Bochtis, C. G. Sorensen, A. A. Sapounas, and O. Green, "A numerical modelling approach for biomass field drying", *Biosist. Eng.*, vol. 106, pp. 458 – 469, 2010.
- [53] H. Ciro velázquez, L. Abud Cano, and L. R. Pérez Alegría, "Numerical Simulation of Thin Layer Coffee Drying by Control Volumes," *Dyna*, vol. 77, pp. 270 – 278, 2010.
- [54] E. Herman-Lara, M. A. Salgado-Cervantes, and M. A. García-Alvarado, "Mathematical simulation of convection food batch drying with assumptions of plug flow and complete mixing of air", *J. Food Eng.*, vol. 68, pp. 321–327, 2005.
- [55] E. Barati and J. A. Esfahani, "Mathematical simulation of convective drying : Spatially distributed temperature and moisture in carrot slab", *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 56, pp. 86–94, 2012.
- [56] P. M. Chauhan and C. Choudhury, "Comparative Performance of Coriander Dryer Coupled to Solar Air Heater and Solar Air - Heater - Cum - Rockbed Storage", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, pp. 475 – 486, 1996.
- [57] V. P. Mohan Chandra and P. Talukdar, "Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 4638–4650, 2010.
- [58] A. Kaya, O. Aydın, and I. Dincer, "Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, pp. 3094–3103, 2006.
- [59] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa, "A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic", *Renew. Energy*, vol. 36, pp. 1053–1062, 2011.
- [60] T. Defraeye, B. Blocken, and J. Carmeliet, "Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modelling", *Heat Mass Transf.*, vol. 55, pp. 112–124, 2012.
- [61] S. Pang and Q. Xu, "Drying of Woody Biomass for Bioenergy Using Packed Moving Bed Dryer: Mathematical Modeling and Optimization", *Dry. Technol.*, vol. 28, pp. 702–709, 2010.
- [62] Q. Xu and S. Pang, "Mathematical Modeling of Rotary Drying of Woody Biomass", *Dry. Technol.*, vol. 26, pp. 1344–1350, 2008.
- [63] J. K. Gigler, W. K. P. Van Loon, M. M. Vissers, and G. P. A. Bot, "Forced convective drying of willow chips", *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, pp. 259–270, 2000.
- [64] S. A. Giner, R. M. Torrez, S. Cicuttín, and C. Fiorentini, "The variable nature of Biot numbers in food drying," *J. Food Eng.*, vol. 101, pp. 214–222, 2010.
- [65] M. A. García and I. I. Ruiz - López, "Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity", *J. Food Eng.*, vol. 79, pp. 208–216, 2007.
- [66] L. Sun, R. Islam, J. C. Ho, and A. S. Mujumdar, "A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes", *Bioresour. Technol.*, vol. 96, pp. 1551–1560, 2005.

- [67] A. J. De Assis, T. S. De Lira, V. V Murata, and M. A. S. Barrozo, "Concurrent Drying of Soybean Seeds: The Effect of Radial Air Profile", in *14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, 2004, no. August, pp. 640–647.
- [68] A. F. Lacerda, M. H. Lisboa, and M. A. S. Barrozo, "Heat and mass transfer in a countercurrent moving bed dryer", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, pp. 2641–2652, 2005.
- [69] J. Cai and S. Chen, "Determination of Drying Kinetics for Biomass by Thermogravimetric Analysis under Nonisothermal Condition", *Dry. Technol.*, vol. 26, pp. 1464–1468, 2008.
- [70] Z. Li and N. Kobayashi, "Determination of Moisture Diffusivity by Thermo-Gravimetric Analysis under Non-Isothermal Condition", *Dry. Technol.*, vol. 23, pp. 1331–1342, 2005.
- [71] B. R. Chavan, A. Yakupitiyage, and S. Kumar, "Mathematical Modeling of Drying Characteristics of Indian Mackerel (*Rastrilliger kangurta*) in Solar-Biomass Hybrid Cabinet Dryer", *Dry. Technol.*, vol. 26, pp. 1552–1562, 2008.
- [72] I. Ivrea, (2013, junio 22), "Arduino Mega," 2012. [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardMega>.
- [73] Micropik, (2014, agosto 12) "Sensor DTH11." [Online]. Available: <http://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf>.
- [74] C. Ratti, *Advance in Food Dehidration*. Boca Raton. CRC Press. 2009, p. 461.
- [75] Z. Wang, J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, and X. Hu, "Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace", *Food Res. Int.*, vol. 40, pp. 39–46, 2007.
- [76] A. Madhlopa and G. Ngwalo, "Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater", *Sol. Energy*, vol. 81, pp. 449–462, 2007.
- [77] D. Montgomery, "*Diseño y Analisis de Experimentos*", México D.F.: Limusa Willey, 2004, p. 686.
- [78] J. C. F. De Winter, "Using the Student's t-test with extremely small sample sizes", *Pract. Assessment, Res. Eval.*, vol. 18, no. 10, pp. 1–12, 2013.
- [79] C. Yunus A., Ghajar, A., "*Heat Transfer*", McGraw-Hill. 2002, p. 874.
- [80] O. I. Chiparus, Tesis Doctoral, "Bagasse fiber for production of nonwoven materials", Technical University "Gh. Asachi". 2004.
- [81] L. A. Cortés and E. O. Gómez, "A method for exergy analysis of sugarcane bagasse boilers", *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 15, pp. 1–14, 1998.

ANEXO 1. Perfiles de Humedad

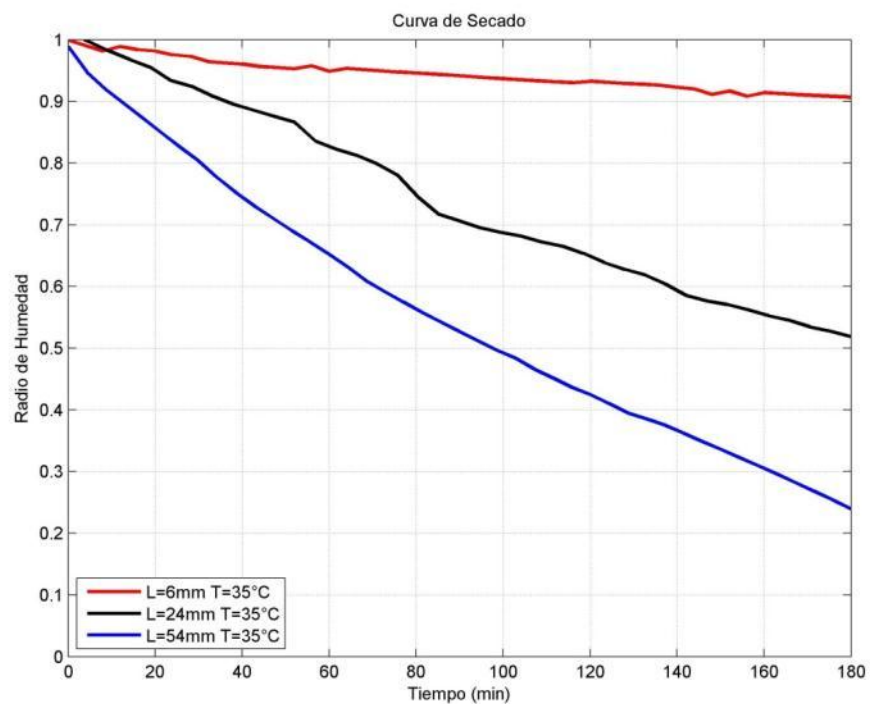


Figura 80. Perfil de humedad para temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

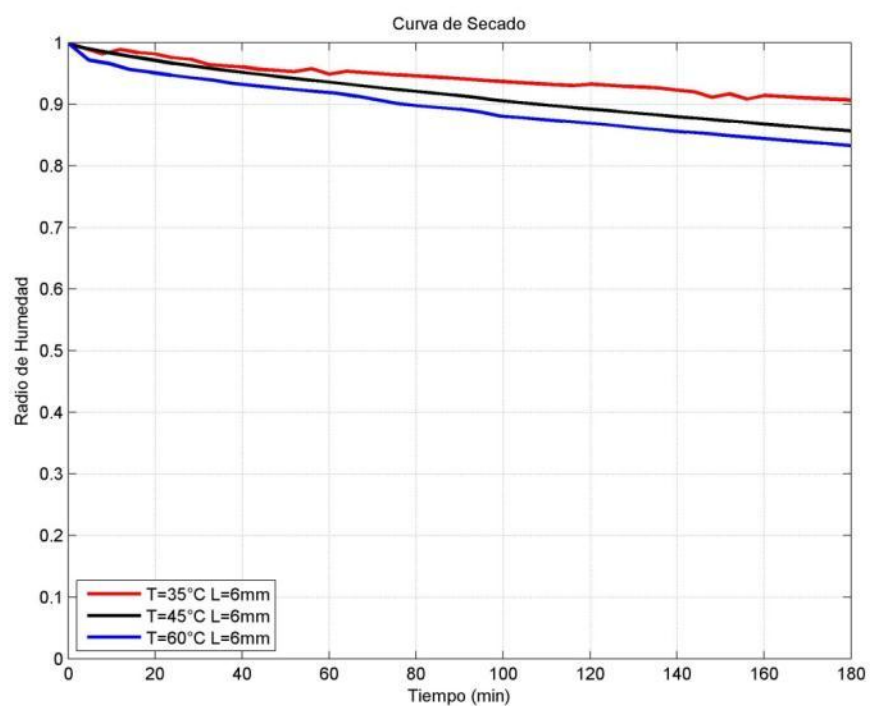


Figura 81. Perfil de humedad para longitud de fibra constante $L=6\text{mm}$

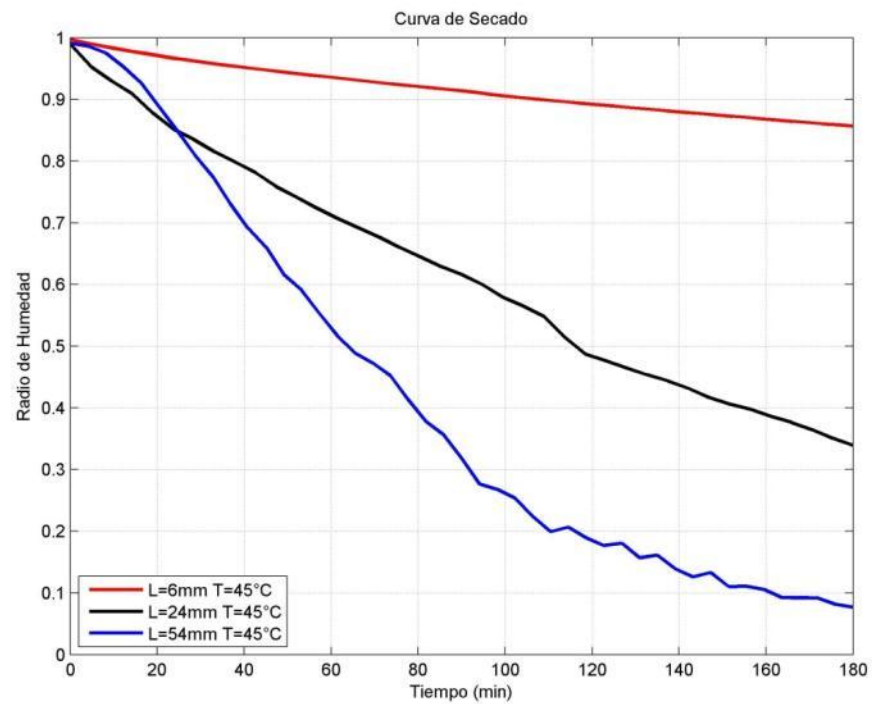


Figura 82. Perfil de humedad para temperatura Constante $T=45^{\circ}\text{C}$

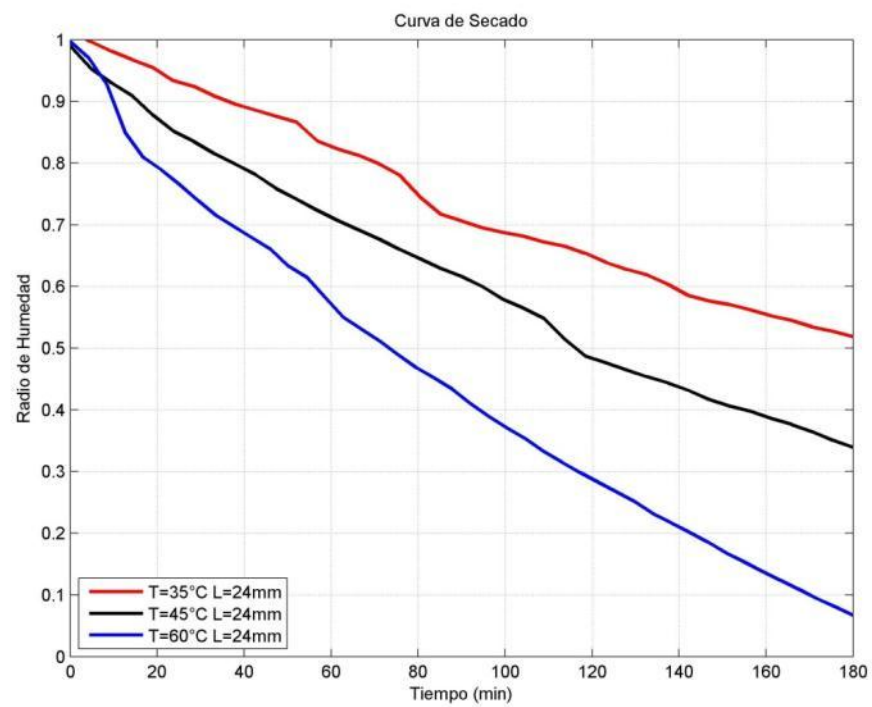


Figura 83. Perfil de humedad para longitud de fibra Constante $L = 24\text{mm}$

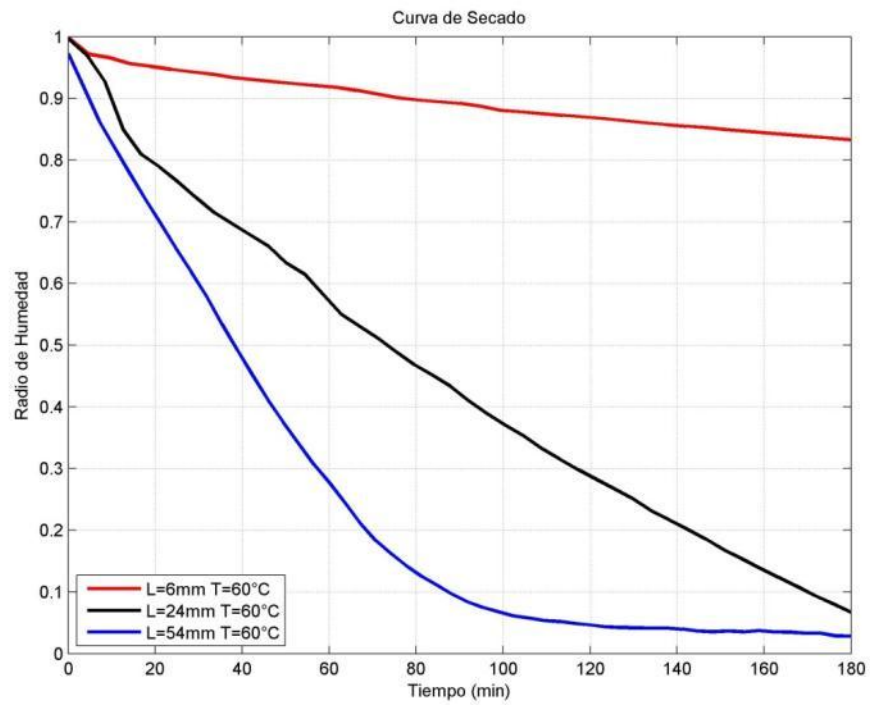


Figura 84. Perfil de humedad para temperatura constante $T = 60^{\circ}\text{C}$

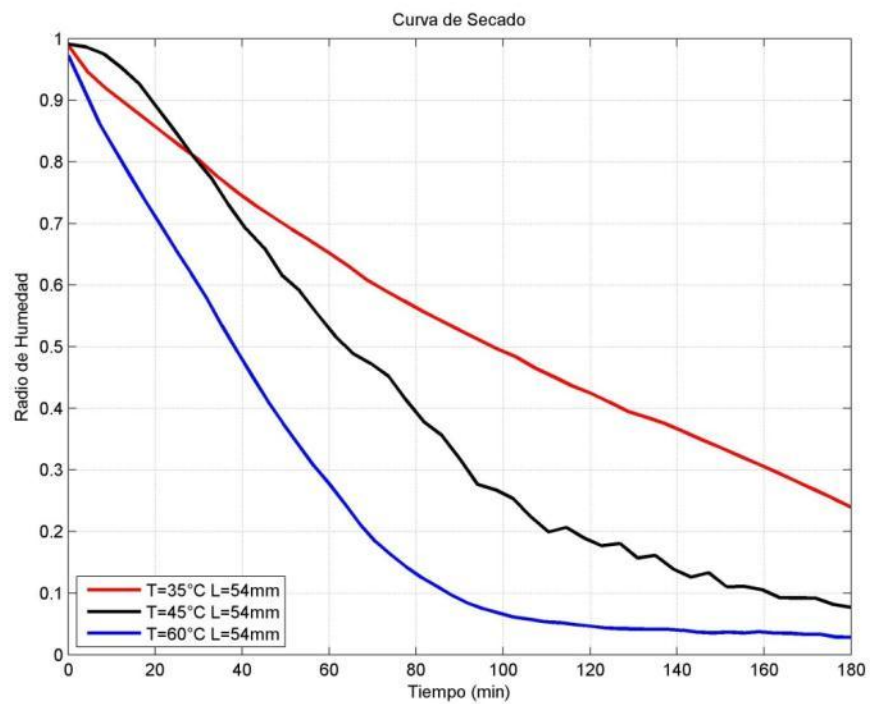
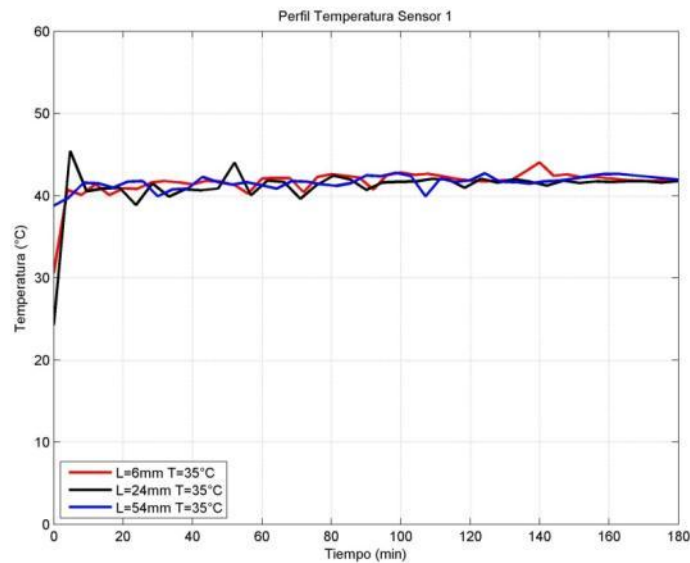
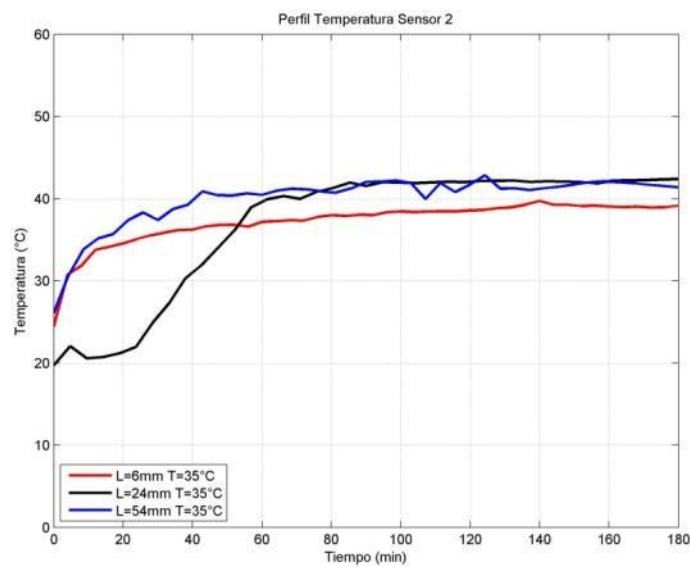


Figura 85. Perfil de humedad para longitud de fibra constante $L = 54\text{mm}$

ANEXO 2. Perfiles de temperatura para temperatura de medio constante**Perfiles para $T=35^{\circ}\text{C}$** Figura 86. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$ Figura 87. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$

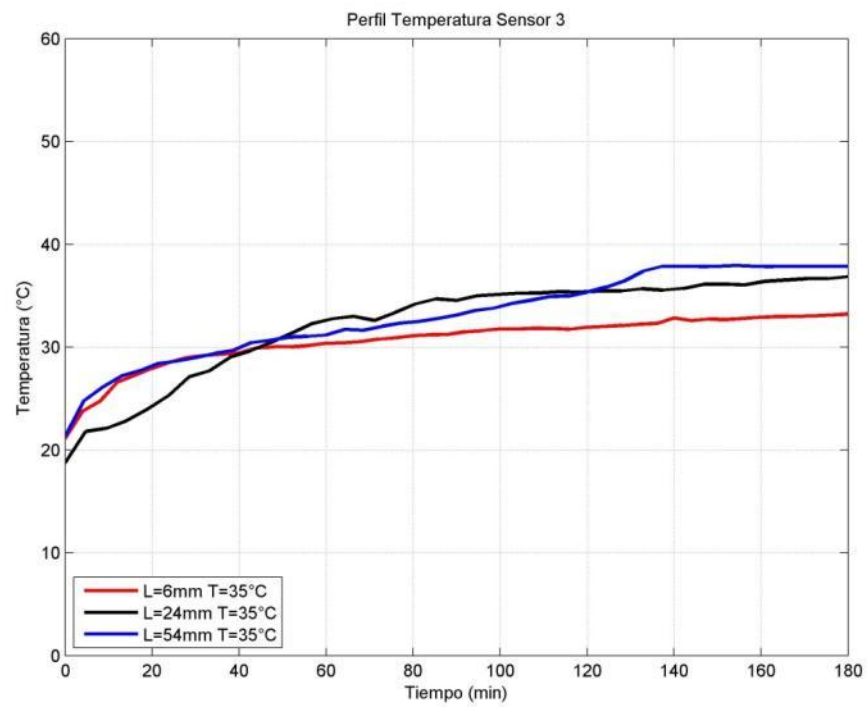


Figura 88. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$

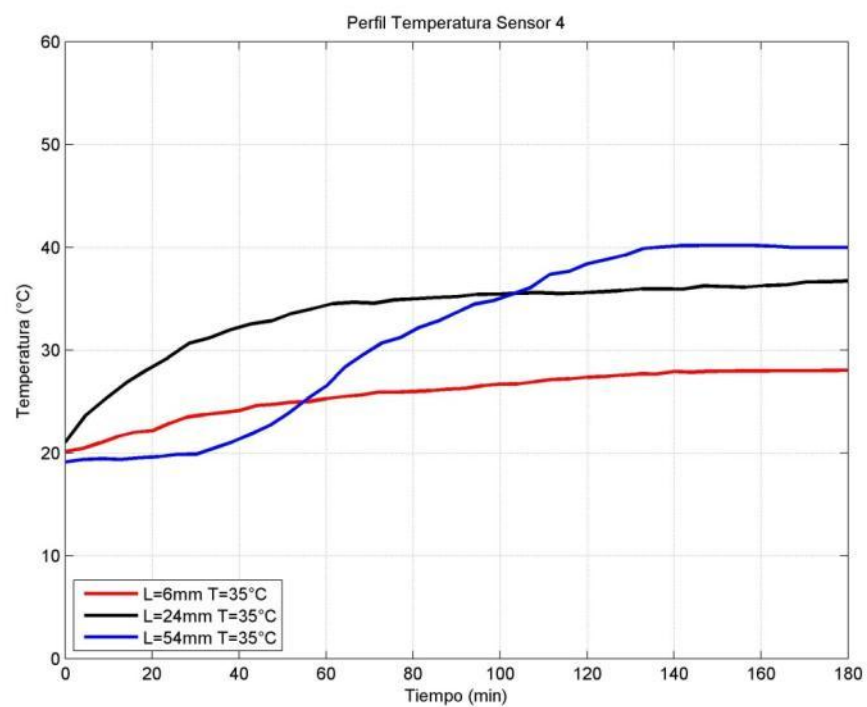


Figura 89. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$

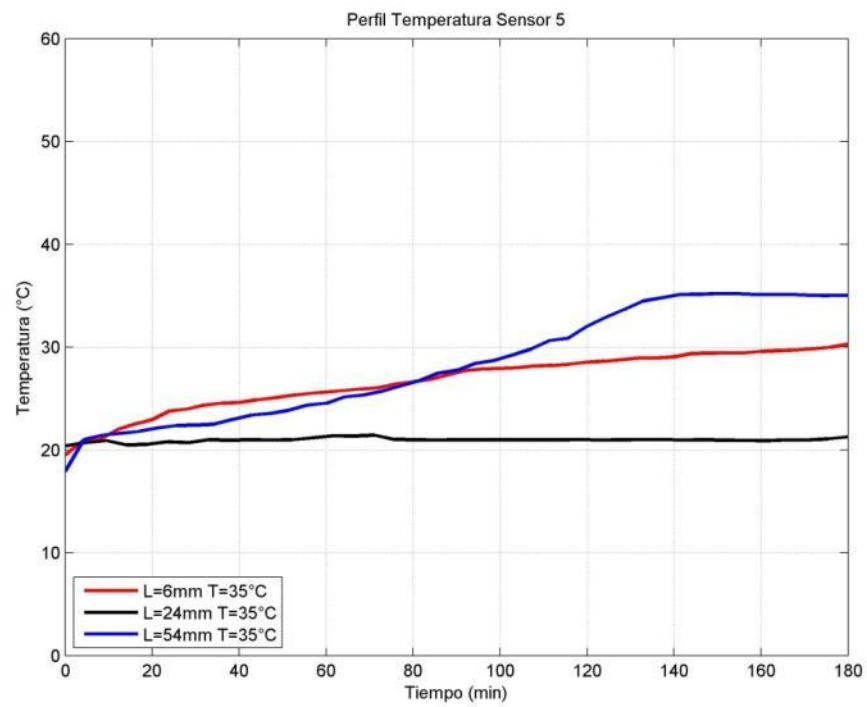


Figura 90. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura $T=35^{\circ}\text{C}$

Perfiles para $T=45^{\circ}\text{C}$

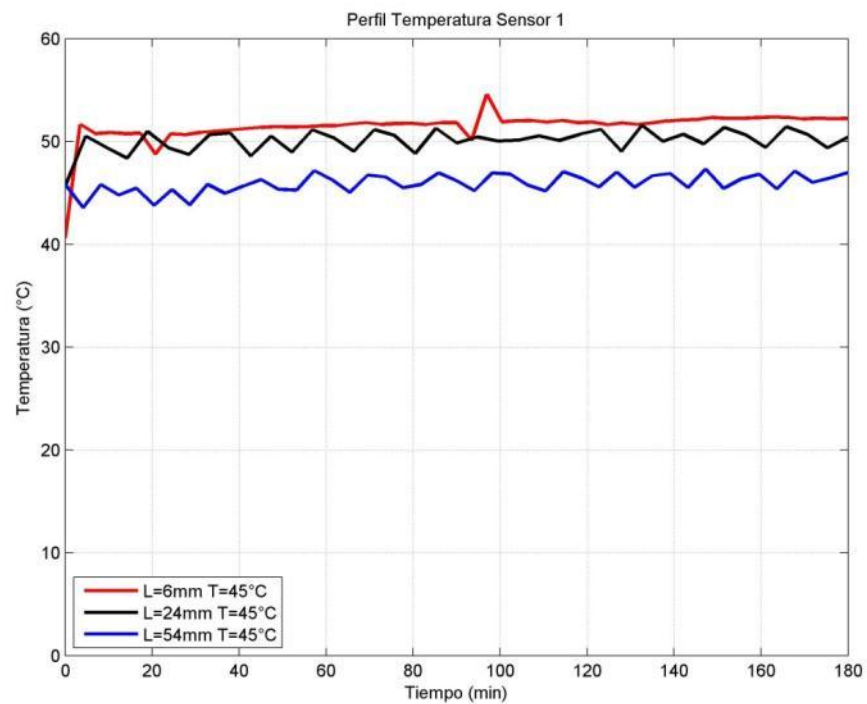


Figura 91. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$

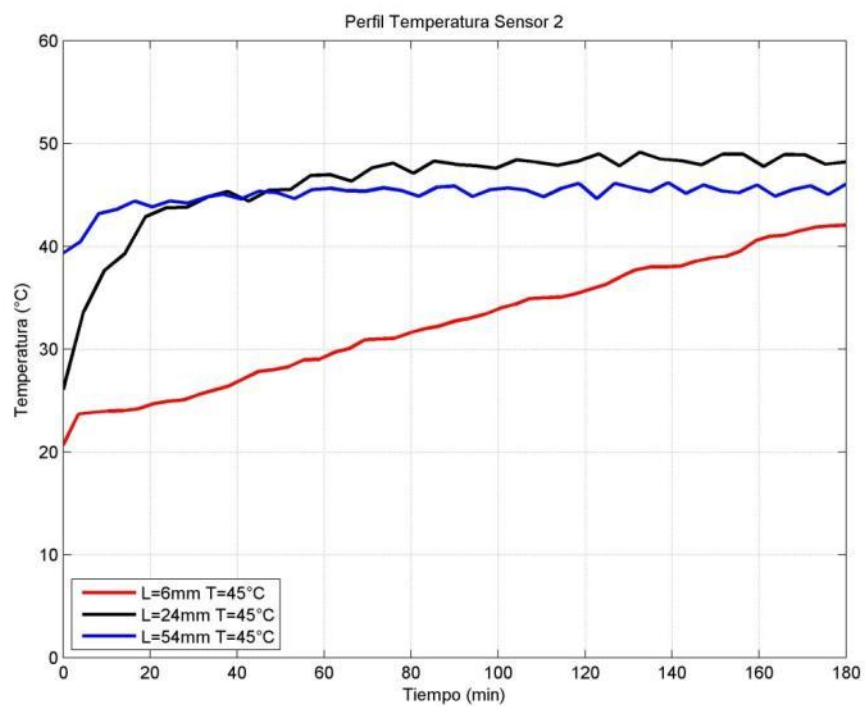


Figura 92. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$

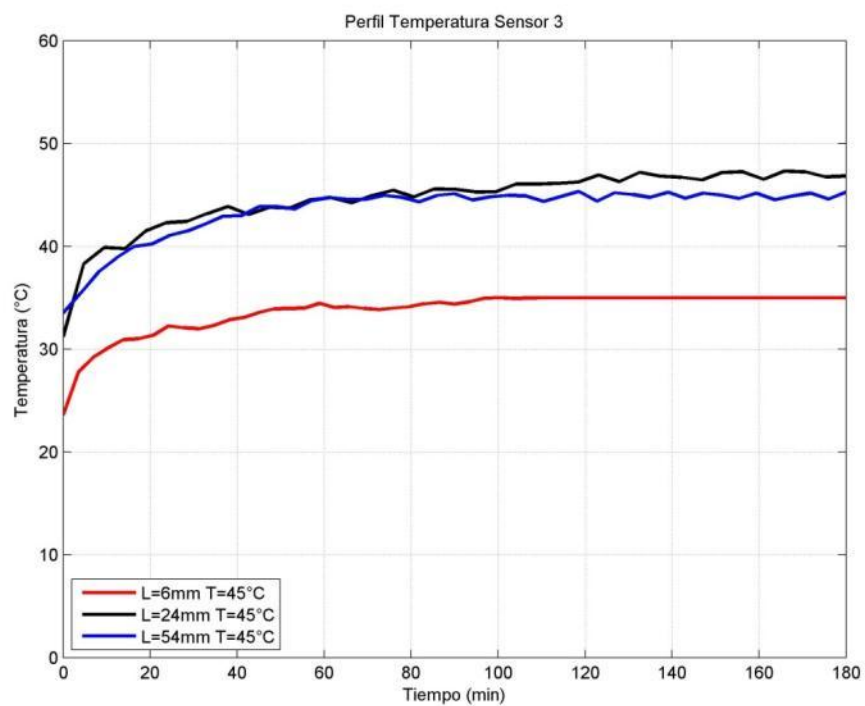
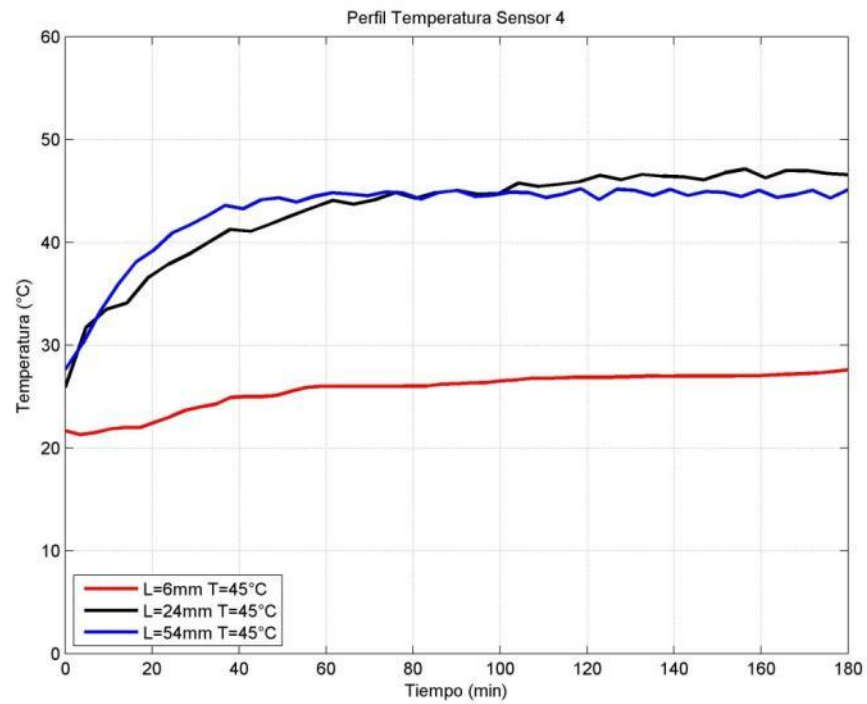
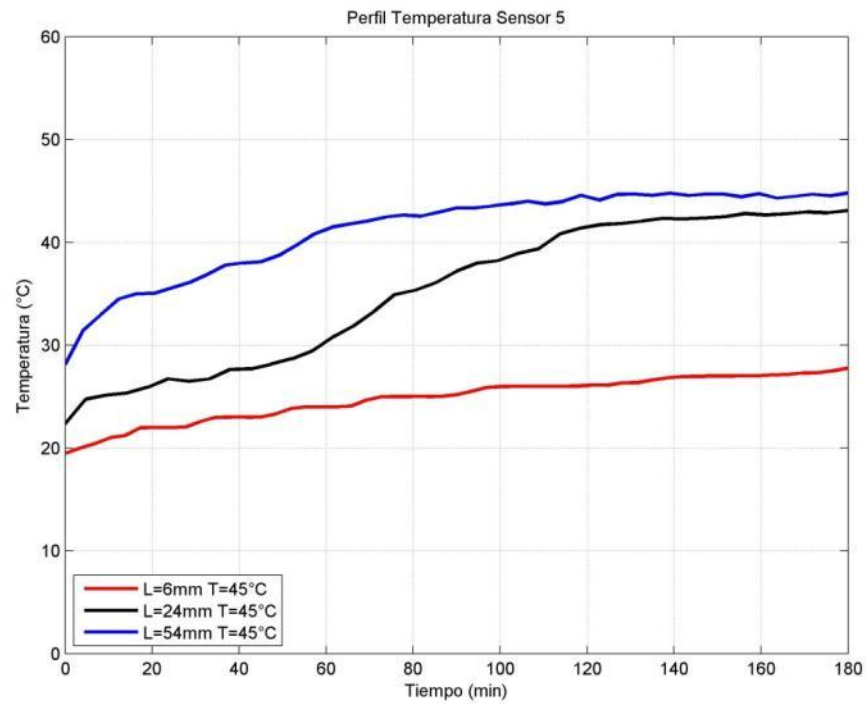


Figura 93. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$

Figura 94. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$ Figura 95. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura $T=45^{\circ}\text{C}$

Perfiles para $T=60^{\circ}\text{C}$

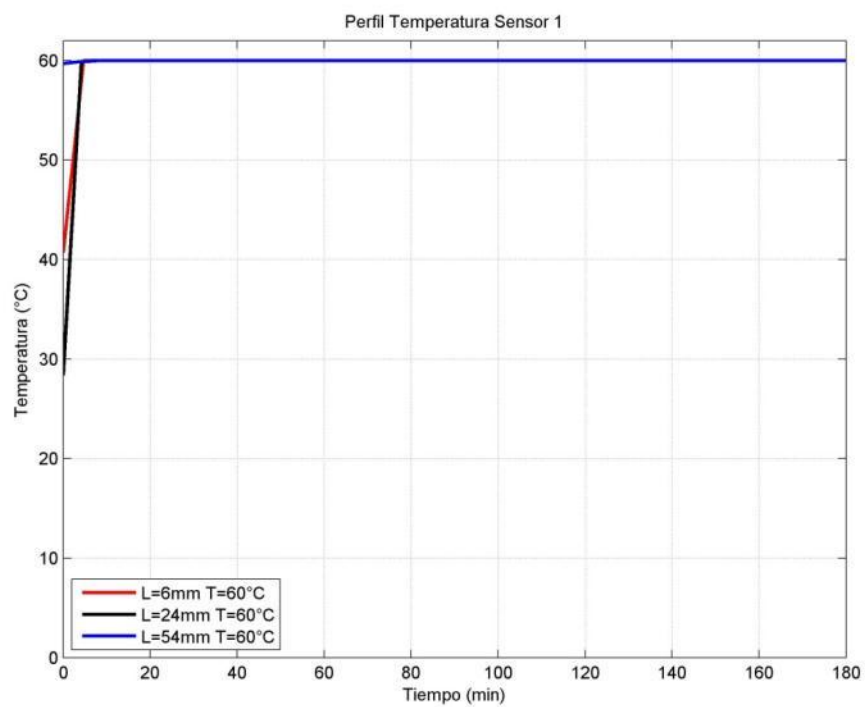


Figura 96. Perfil de temperatura del sensor 1 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$

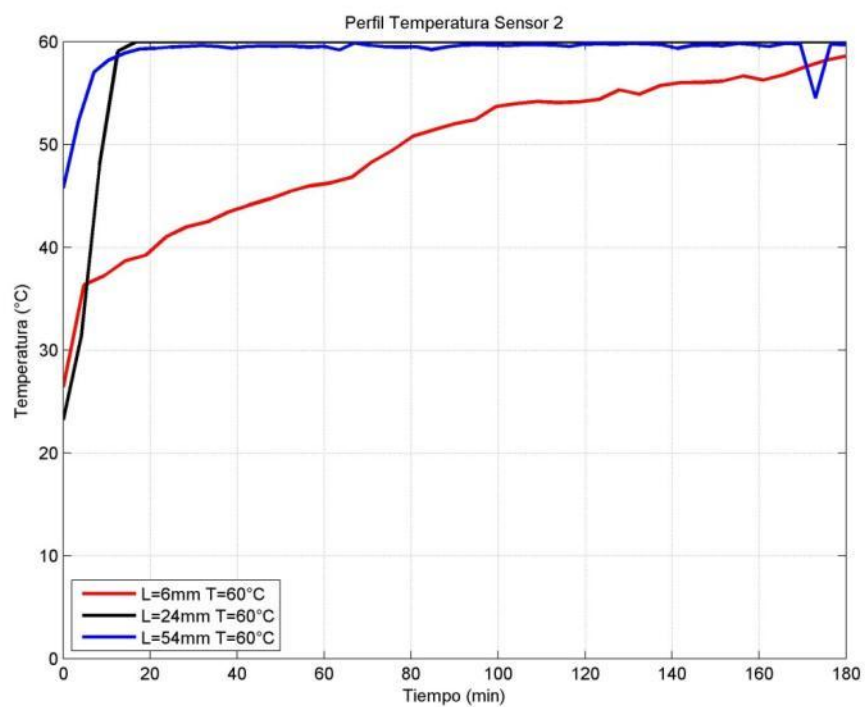


Figura 97. Perfil de temperatura del sensor 2 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$

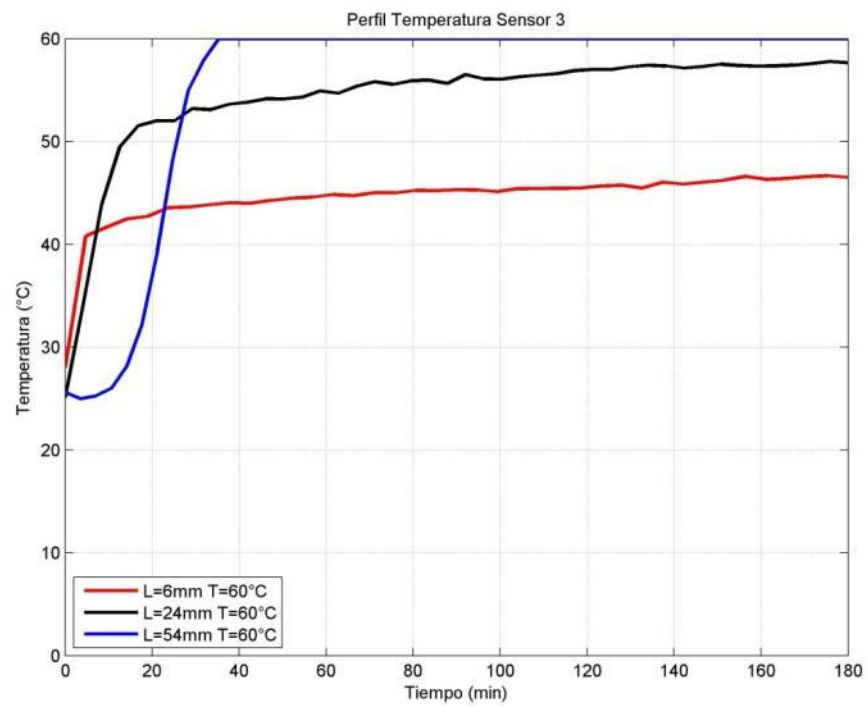


Figura 98. Perfil de temperatura del sensor 3 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$

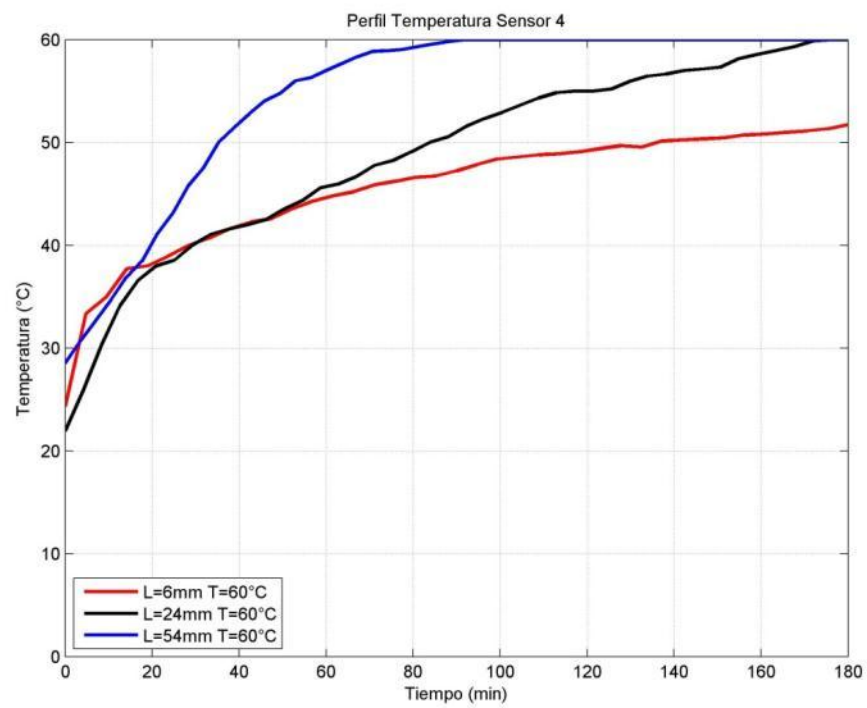


Figura 99. Perfil de temperatura del sensor 4 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$

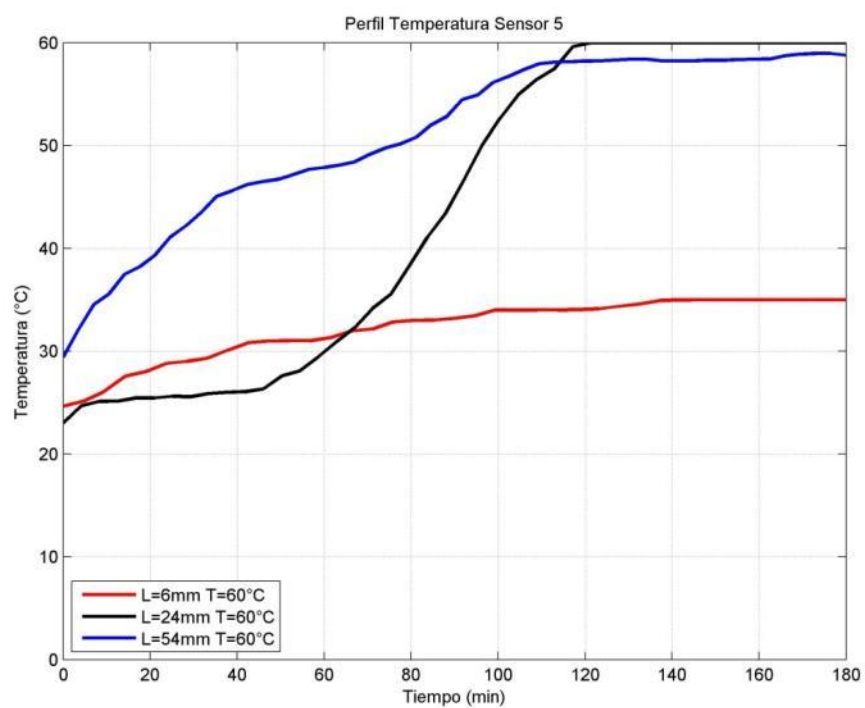


Figura 100. Perfil de temperatura del sensor 5 para una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$

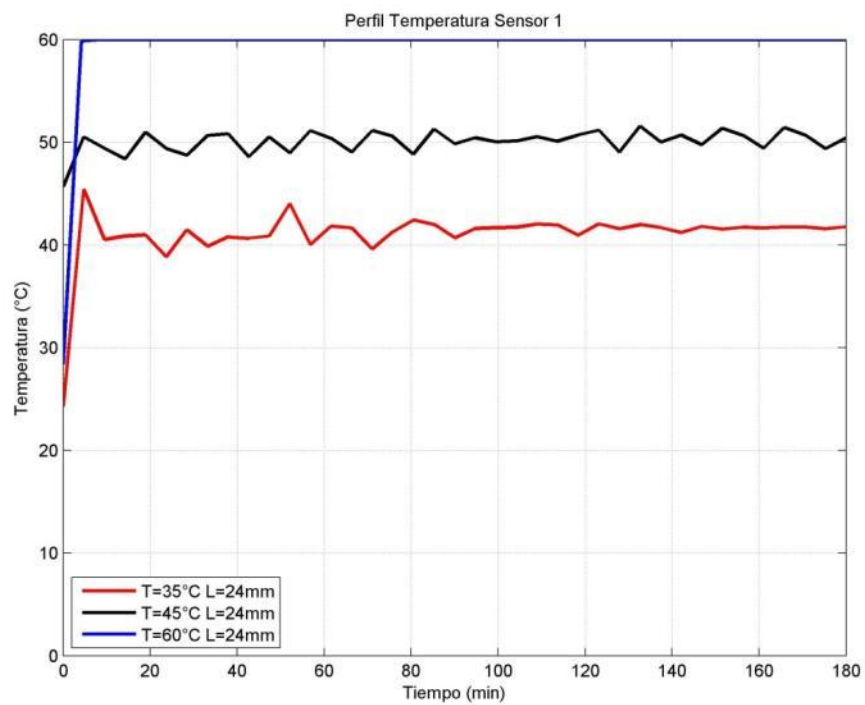
ANEXO 3. Perfiles de Temperatura para longitud de fibra constante**Perfiles para L=24mm**

Figura 101. Perfil de temperatura sensor 1 para longitud de fibra constante L=24mm

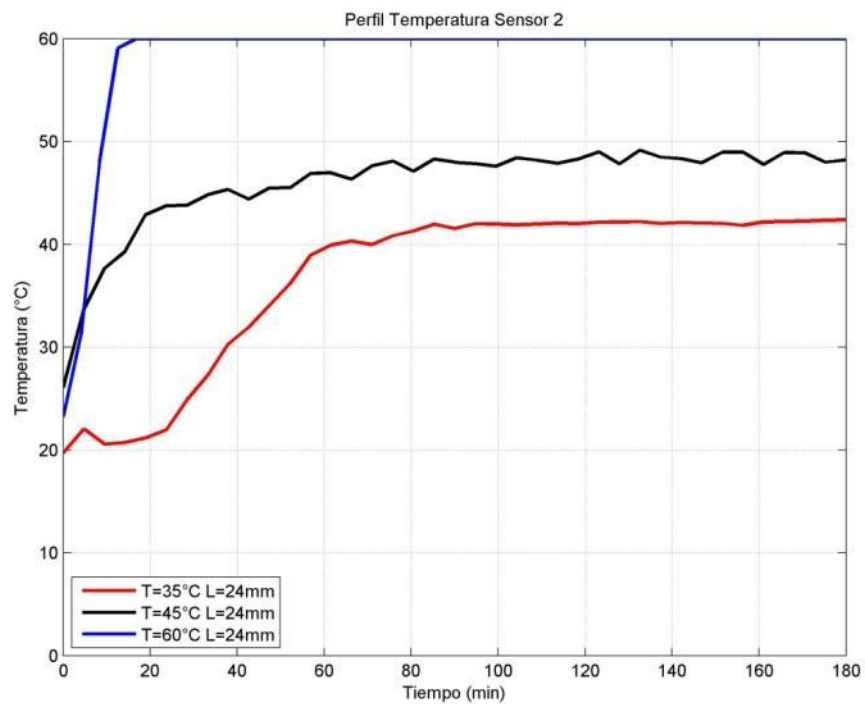


Figura 102. Perfil de temperatura sensor 2 para longitud de fibra constante L=24mm

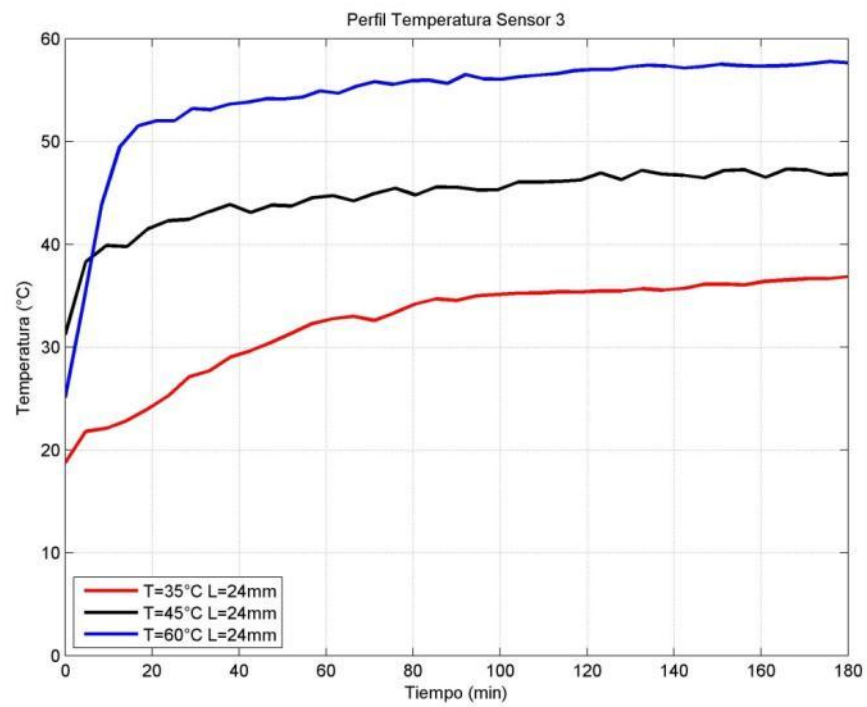


Figura 103. Perfil de temperatura sensor 2 para longitud de fibra constante L=24mm

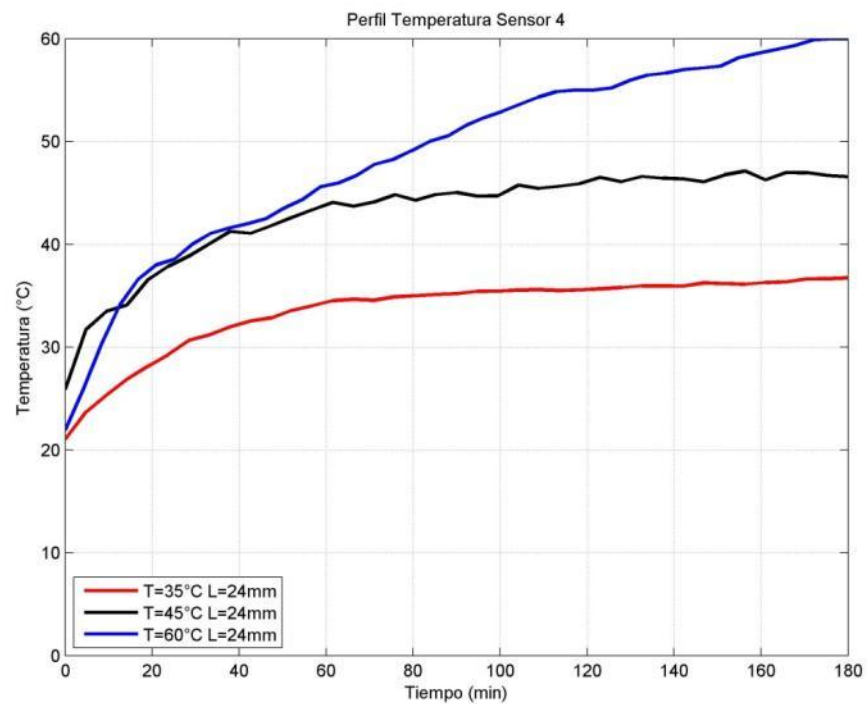


Figura 104. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=24mm

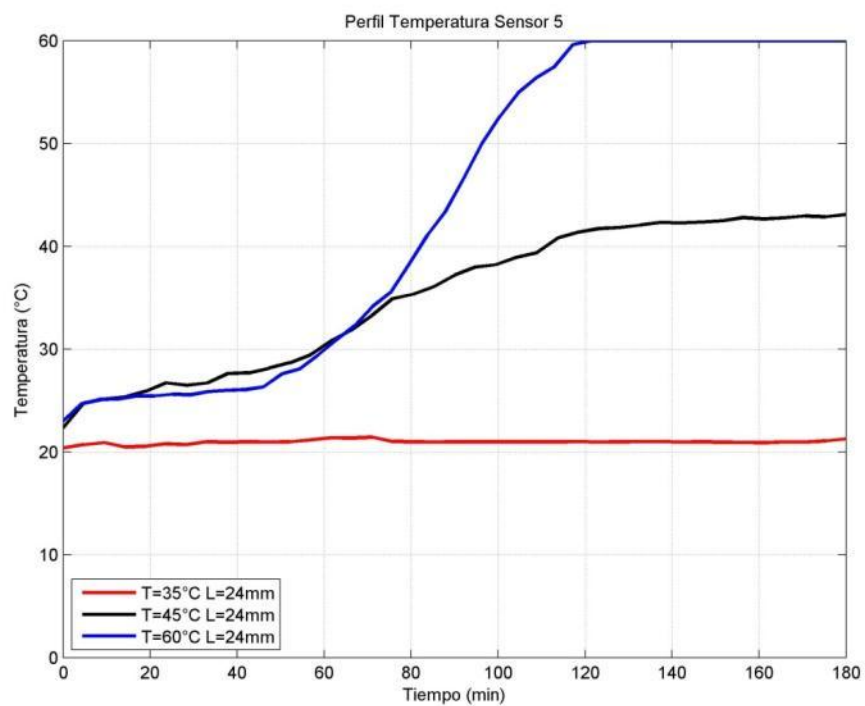


Figura 105. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=24mm

Perfiles para L=6mm

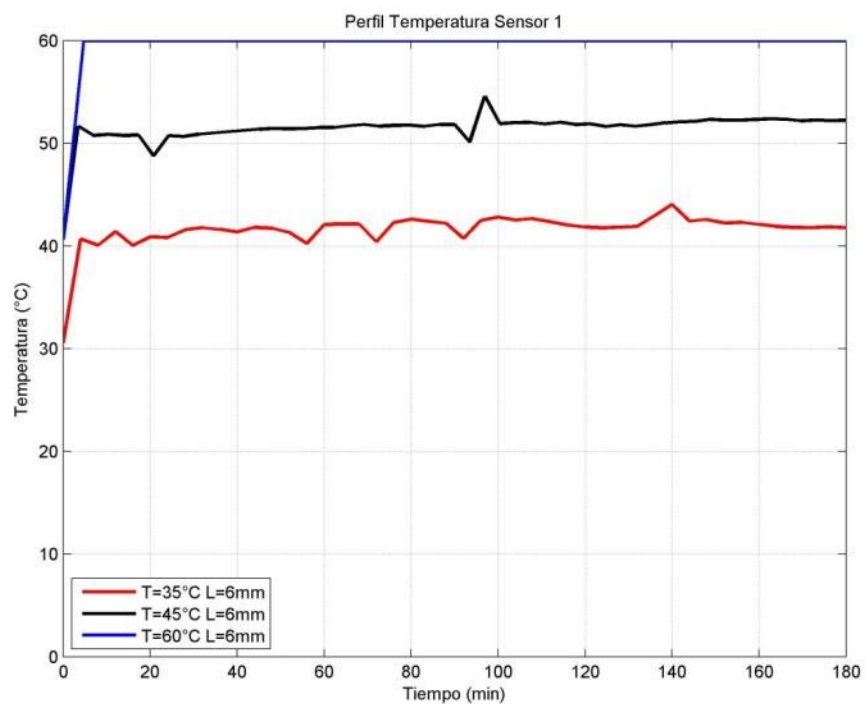


Figura 106. Perfil de temperatura sensor 1 para longitud de fibra constante L=6mm

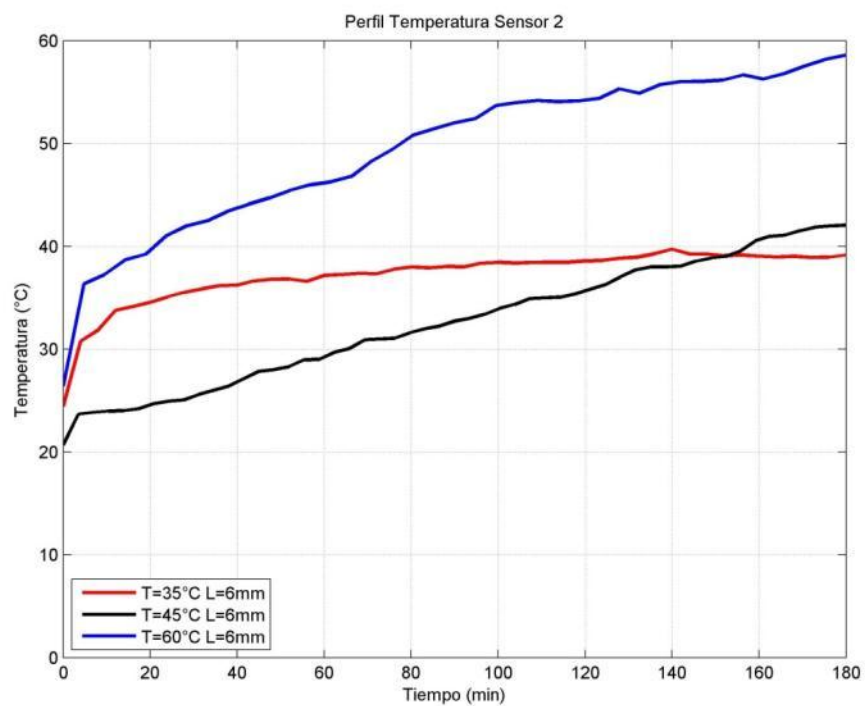


Figura 107. Perfil de temperatura Sensor 2 para longitud de fibra constante L=6mm

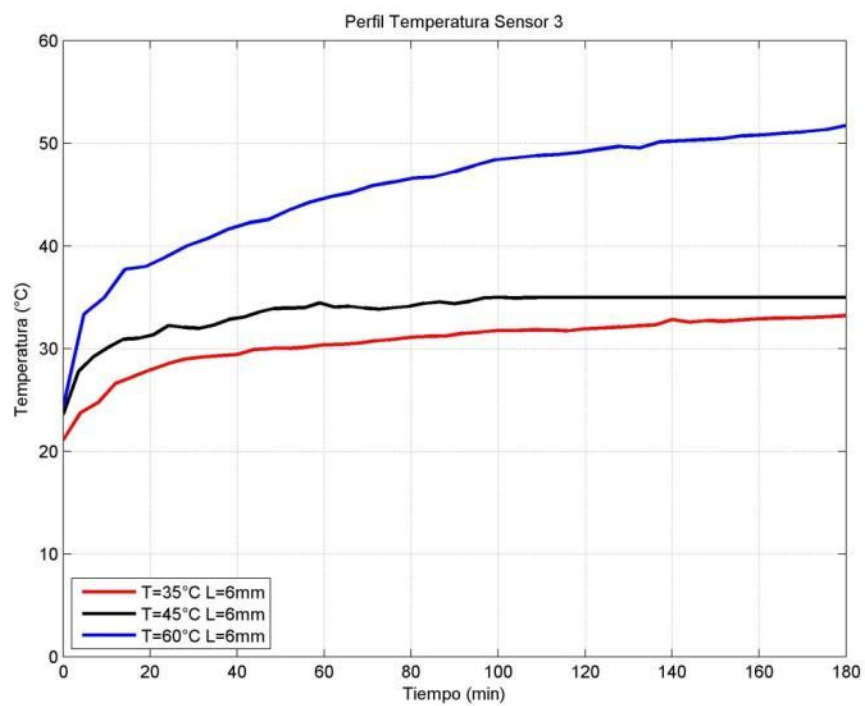


Figura 108. Perfil de temperatura sensor 3 para longitud de fibra constante L=6mm

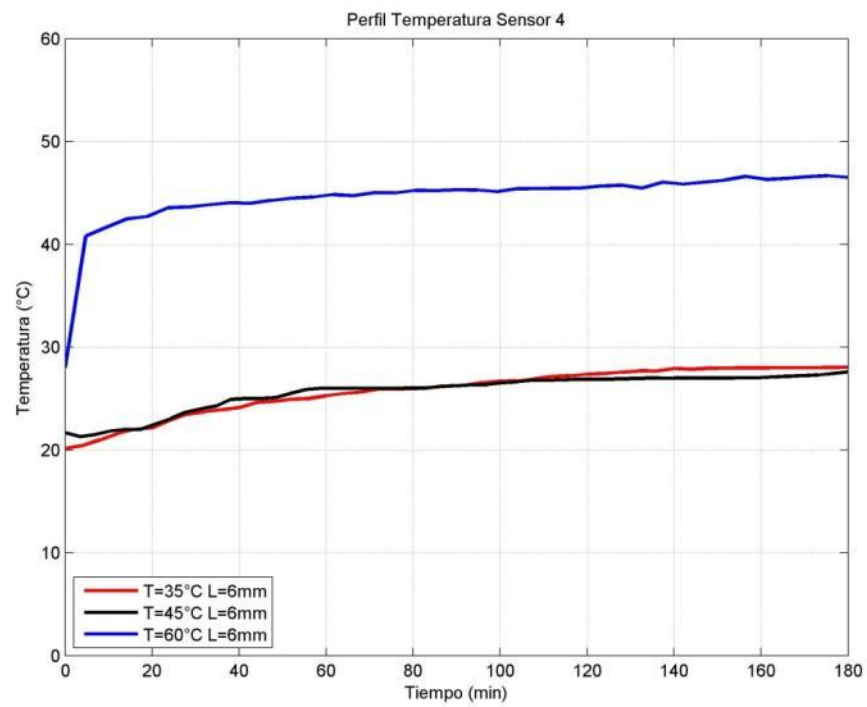


Figura 109. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=6mm

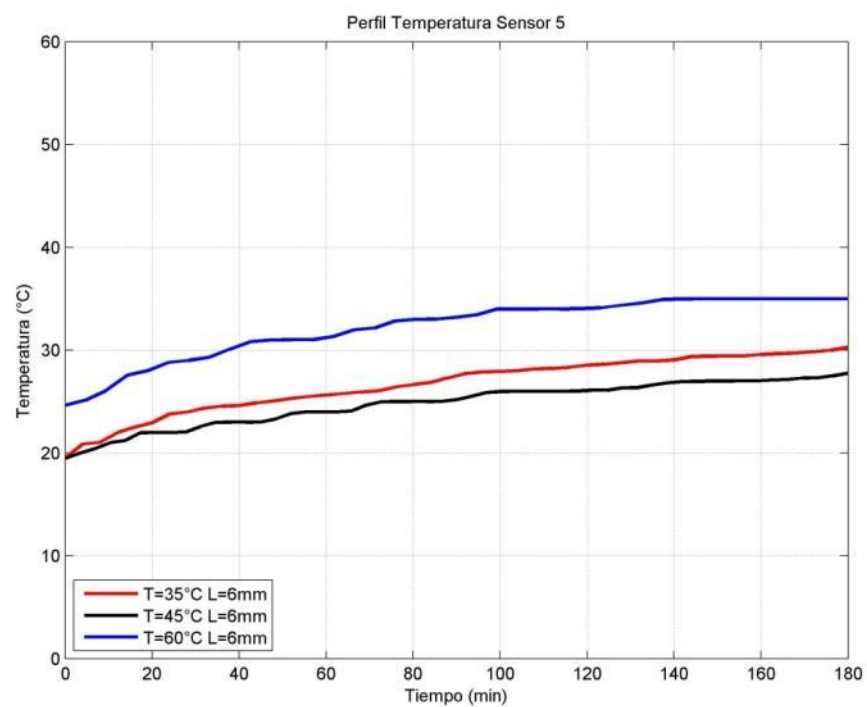


Figura 110. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante L=6mm

Perfiles para $L = 54\text{mm}$

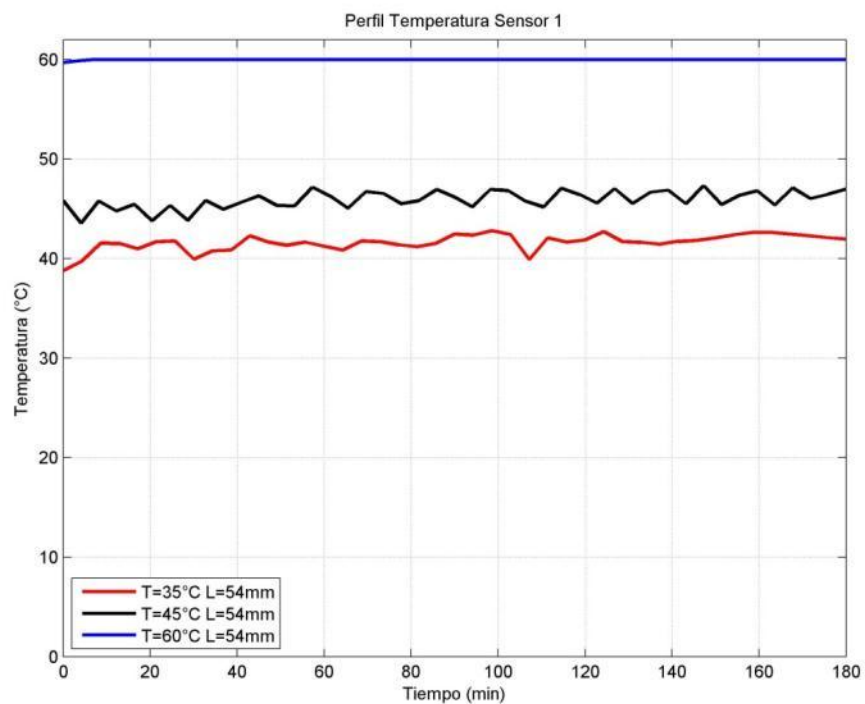


Figura 111. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante $L=54\text{mm}$

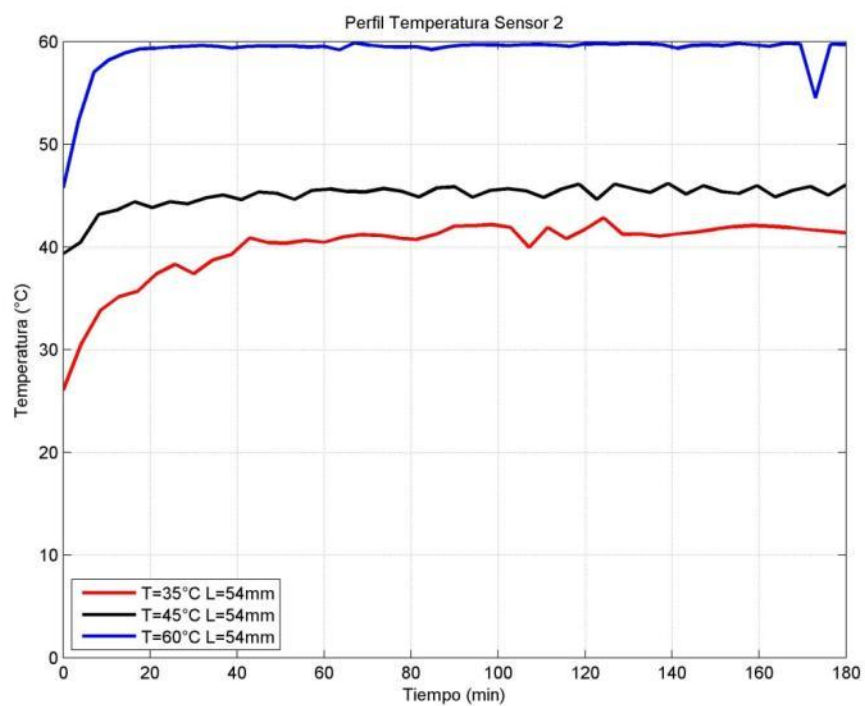


Figura 112. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante $L=54\text{mm}$

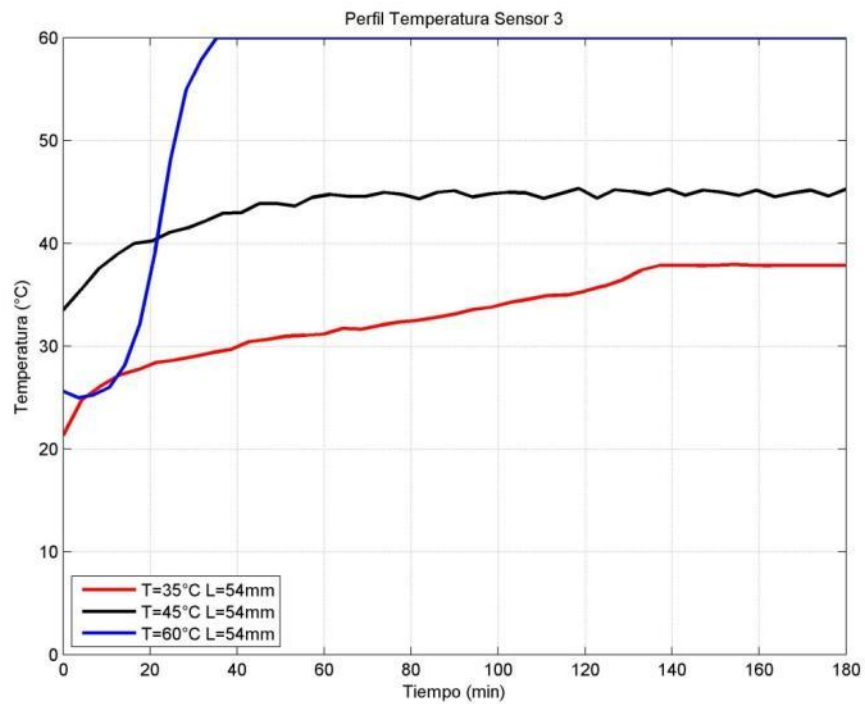


Figura 113. Perfil de temperatura sensor 3 para longitud de fibra constante L=54mm

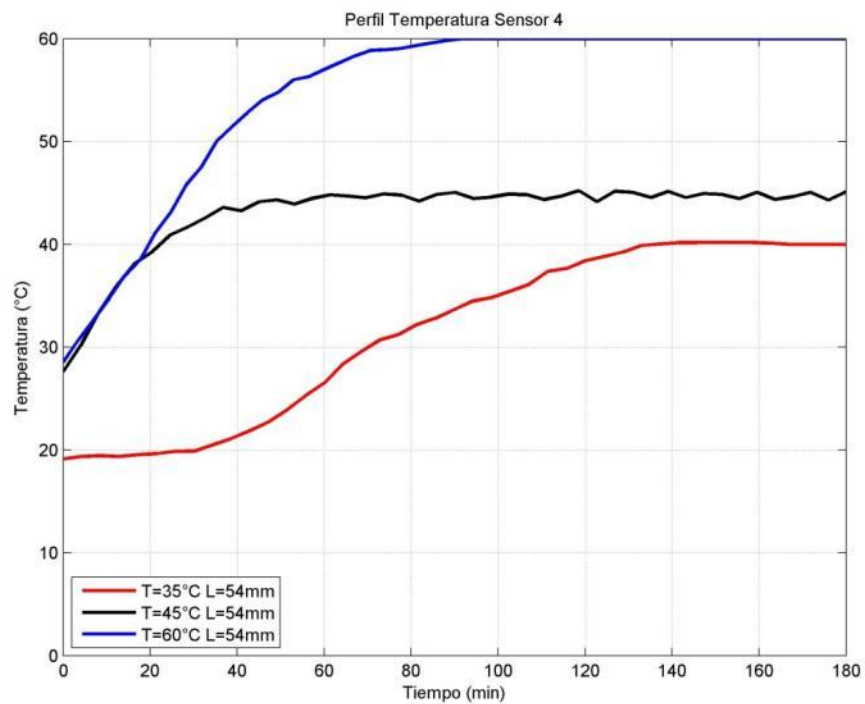


Figura 114. Perfil de temperatura sensor 4 para longitud de fibra constante L=54mm

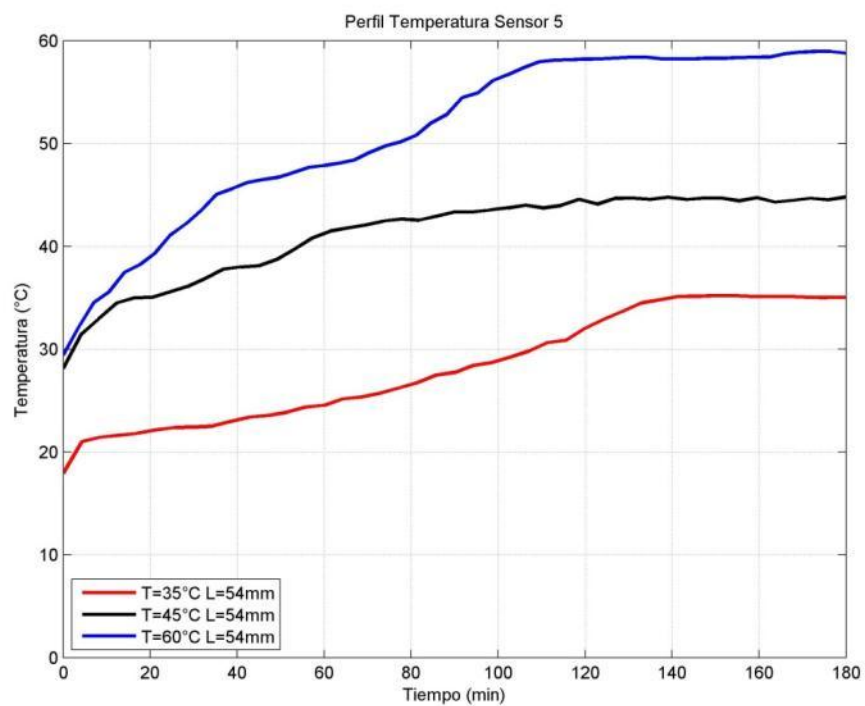


Figura 115. Perfil de temperatura sensor 5 para longitud de fibra constante $L=54\text{mm}$

ANEXO 4. Humedad relativa del medio de secado

Influencia de la Longitud de fibra para $T = 60^{\circ}\text{C}$.

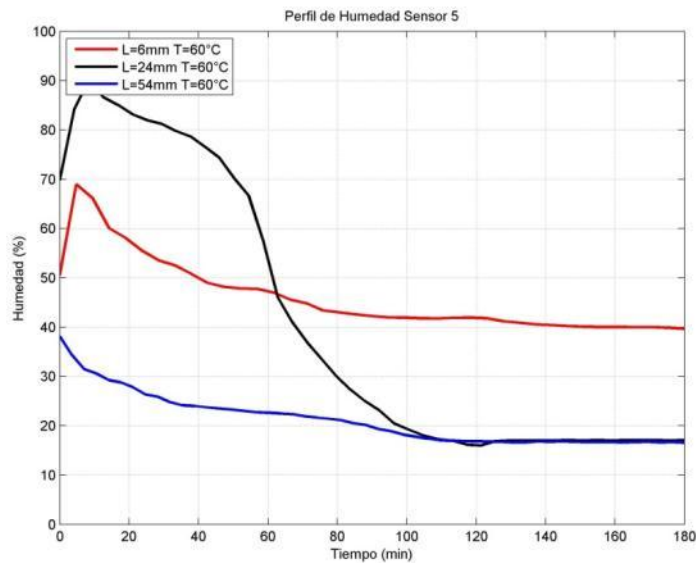


Figura 116. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante $T=60^{\circ}\text{C}$

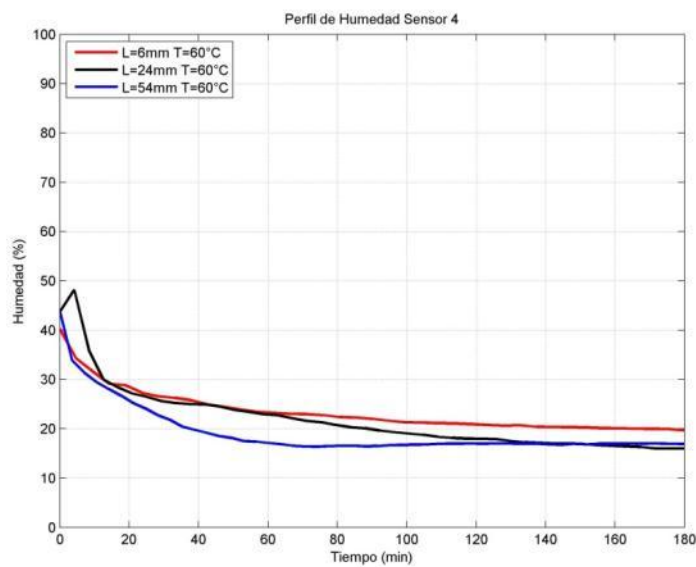


Figura 117. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante $T=60^{\circ}\text{C}$

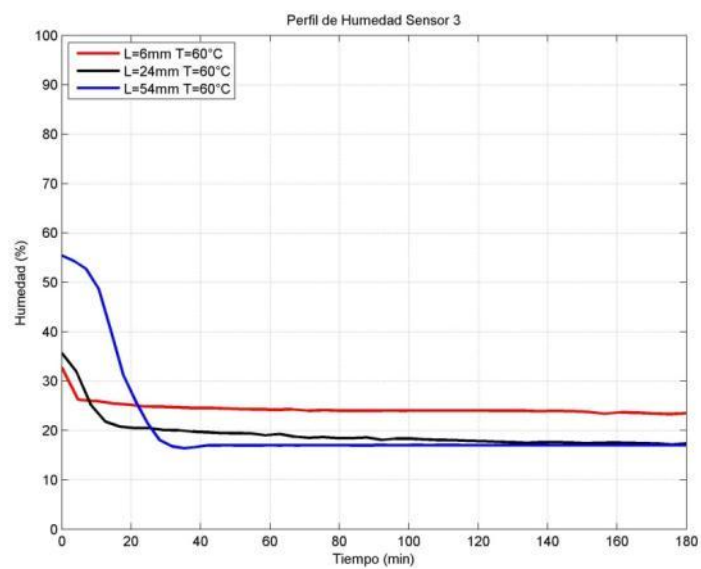


Figura 118. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante $T=60^{\circ}\text{C}$

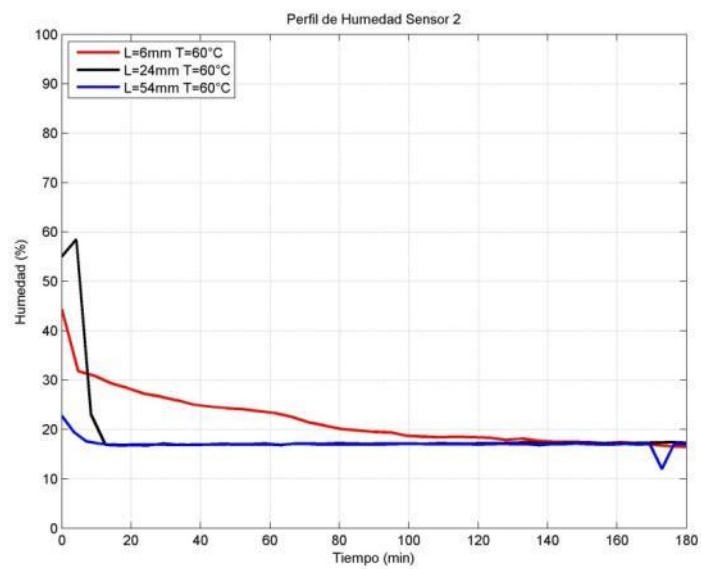


Figura 119. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante $T=60^{\circ}\text{C}$

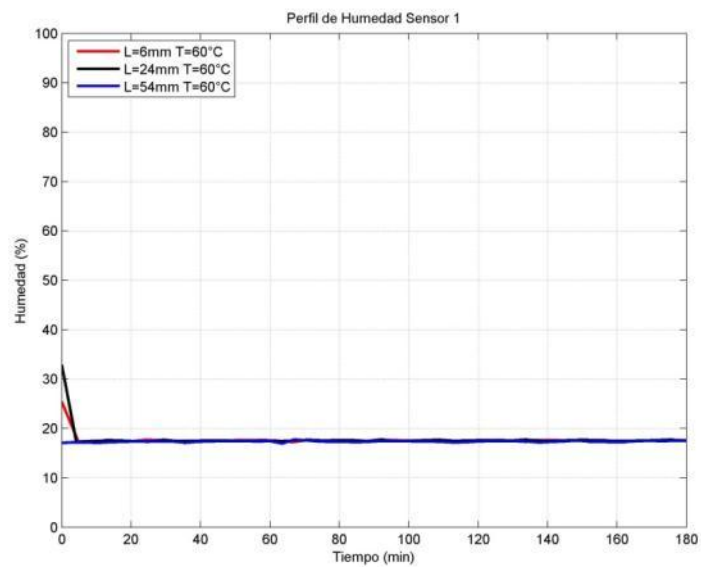


Figura 120. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante $T=60^{\circ}\text{C}$

Influencia de la Longitud de fibra para $T = 45^{\circ}\text{C}$.

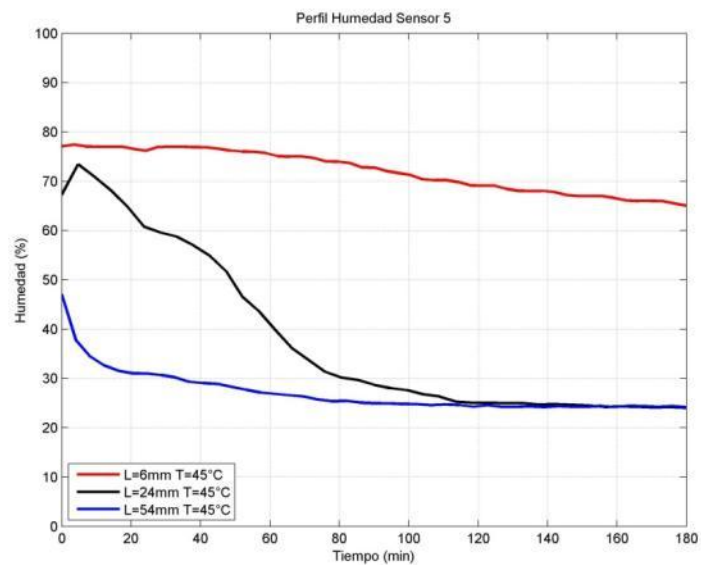


Figura 121. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante $T=45^{\circ}\text{C}$

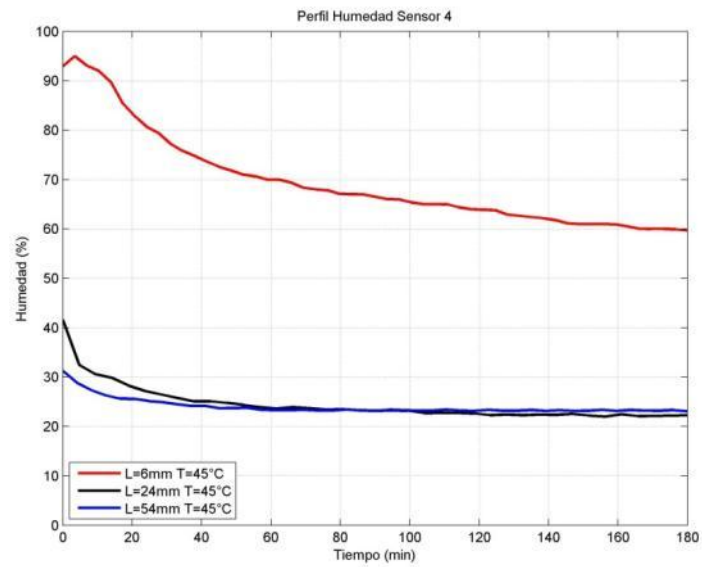


Figura 122. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante $T=45^{\circ}\text{C}$

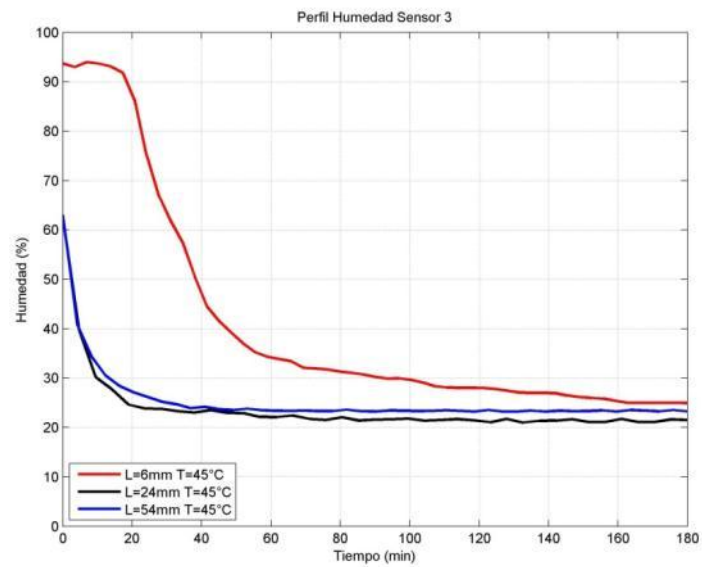


Figura 123. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante $T=45^{\circ}\text{C}$

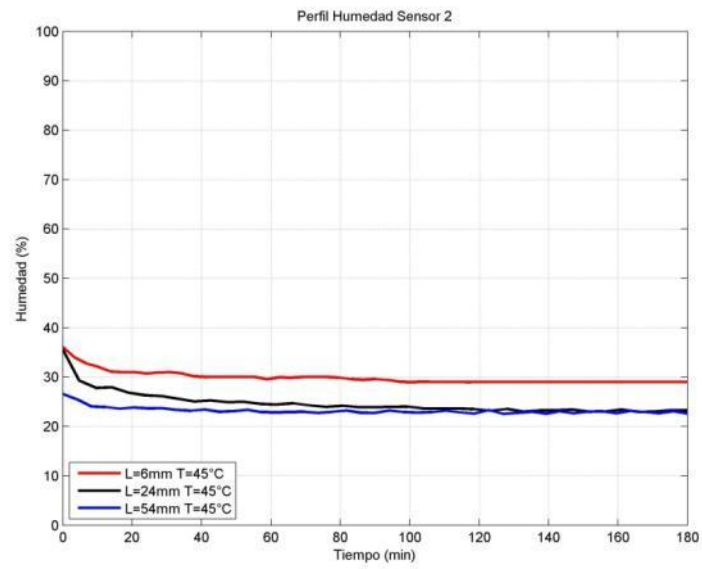


Figura 124. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante $T=45^{\circ}\text{C}$

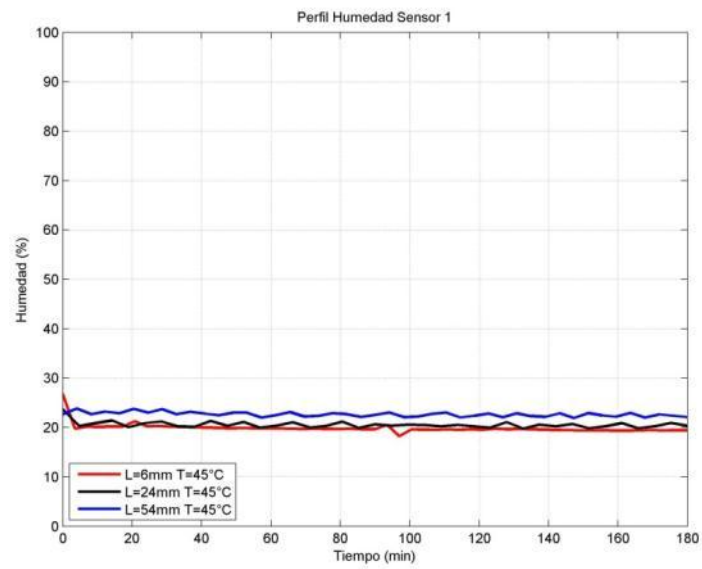


Figura 125. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante $T=45^{\circ}\text{C}$

Influencia de la Longitud de fibra para $T = 35^{\circ}\text{C}$.

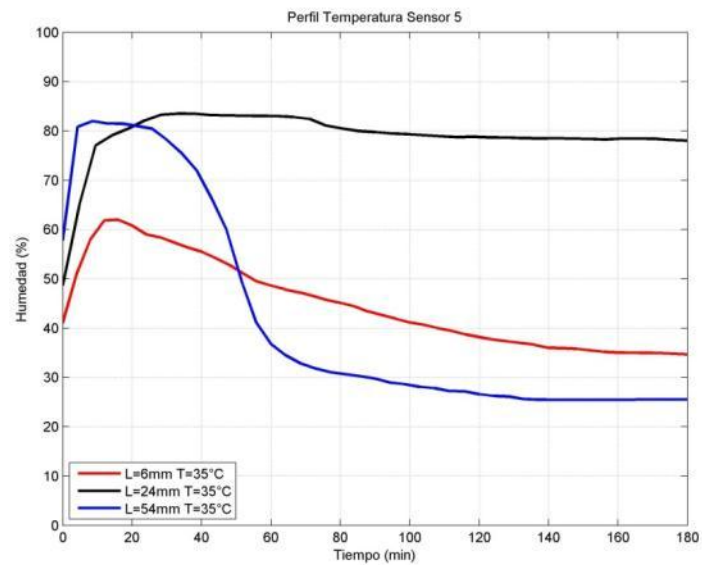


Figura 126. Perfil de humedad para el sensor 5 a temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

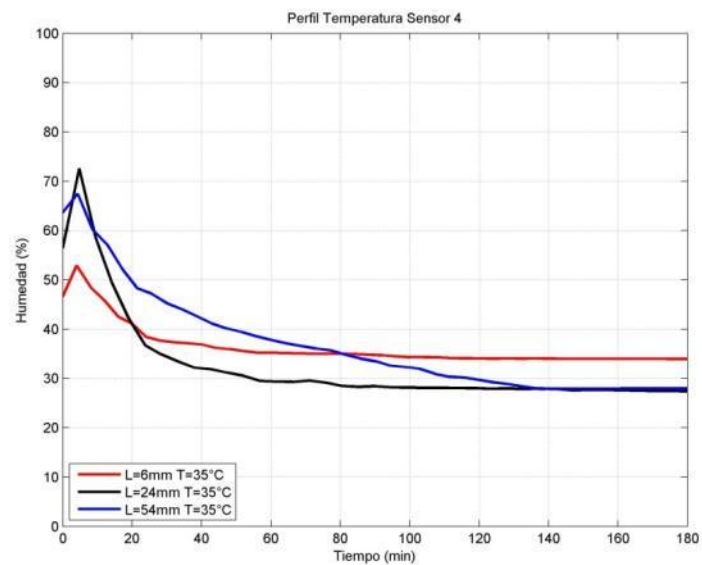


Figura 127. Perfil de humedad para el sensor 4 a temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

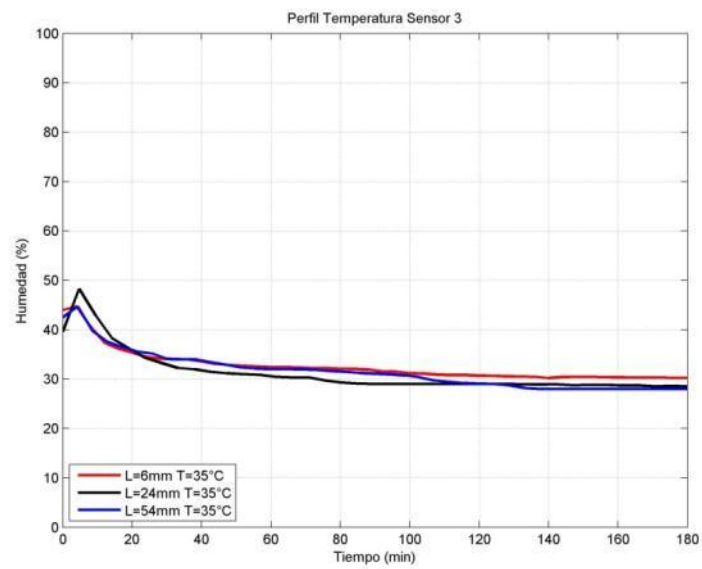


Figura 128. Perfil de humedad para el sensor 3 a temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

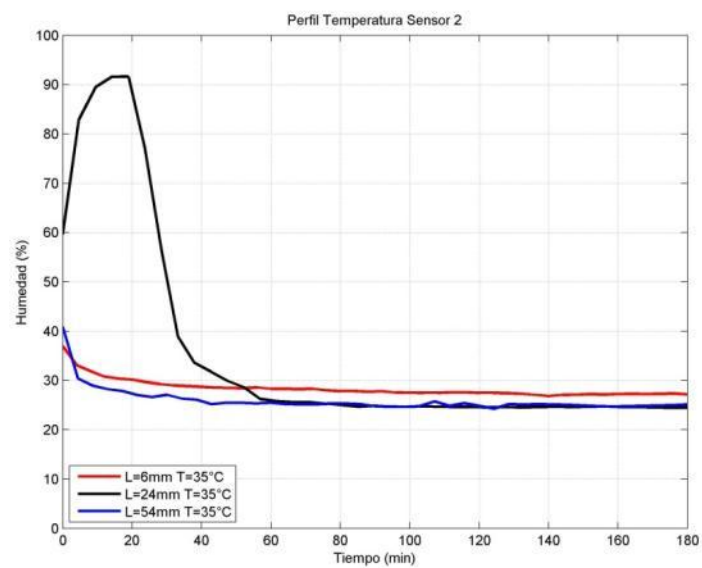


Figura 129. Perfil de humedad para el sensor 2 a temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

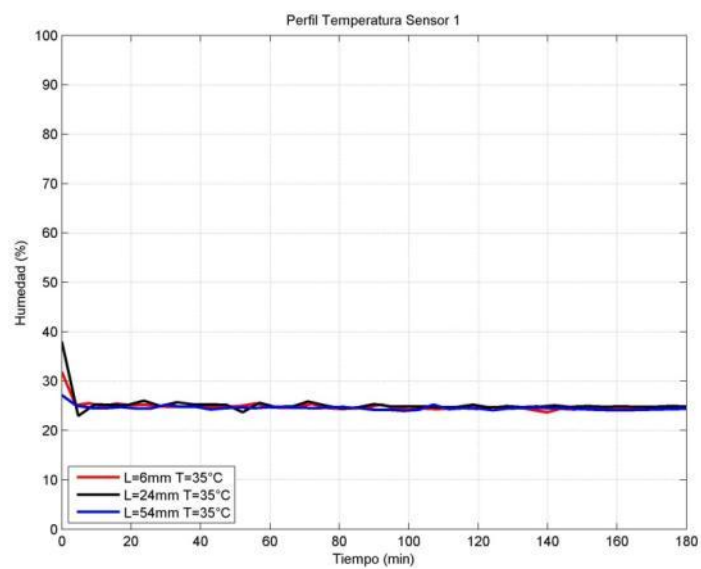


Figura 130. Perfil de humedad para el sensor 1 a temperatura constante $T=35^{\circ}\text{C}$

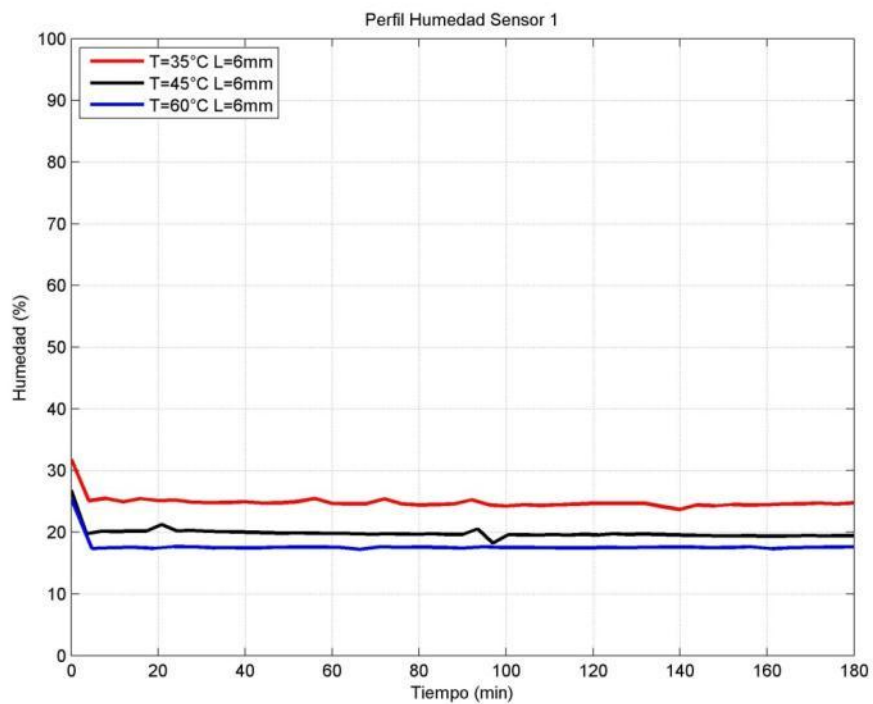
ANEXO 5. Influencia de la Longitud de fibra en la Humedad Relativa del Aire**Perfiles para L=6mm**

Figura 131. Perfil de humedad para el sensor 1 para longitud de fibra constante L=6mm

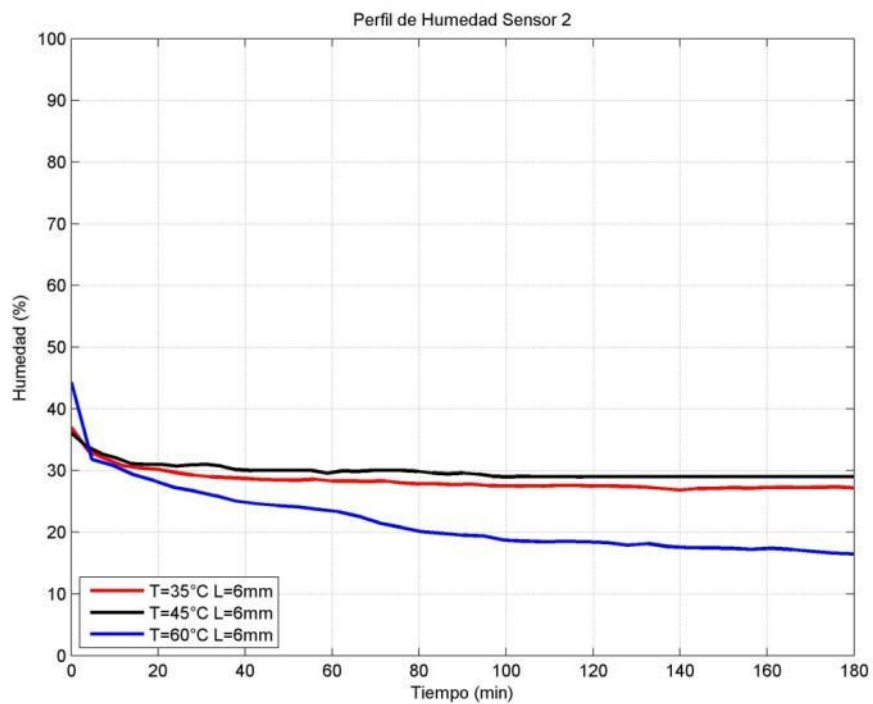


Figura 132. Perfil de humedad para el sensor 2 para longitud de fibra constante L=6mm

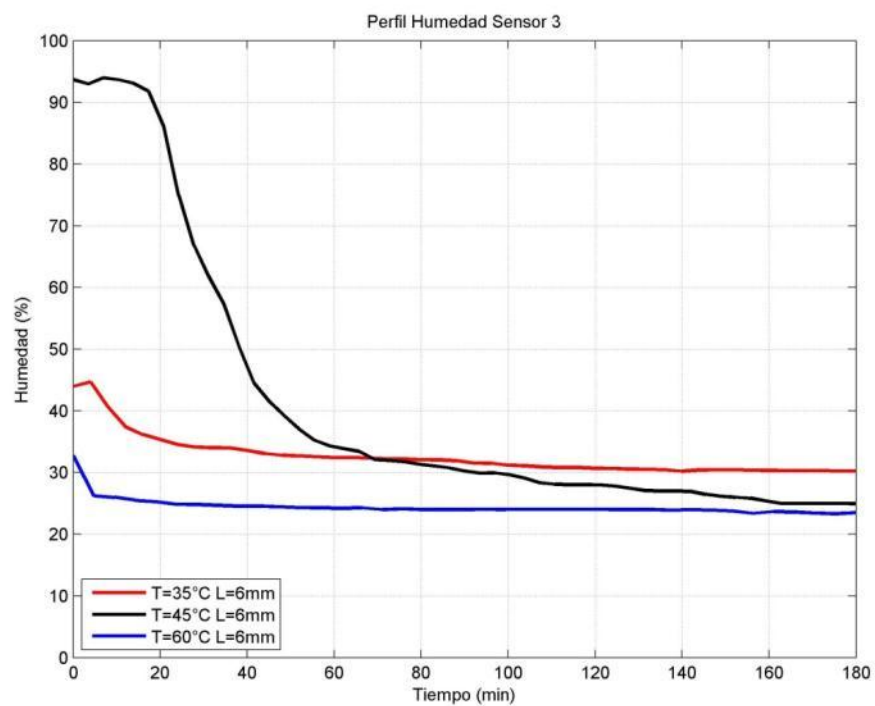


Figura 133. Perfil de humedad para el sensor 3 para longitud de fibra constante $L=6\text{mm}$

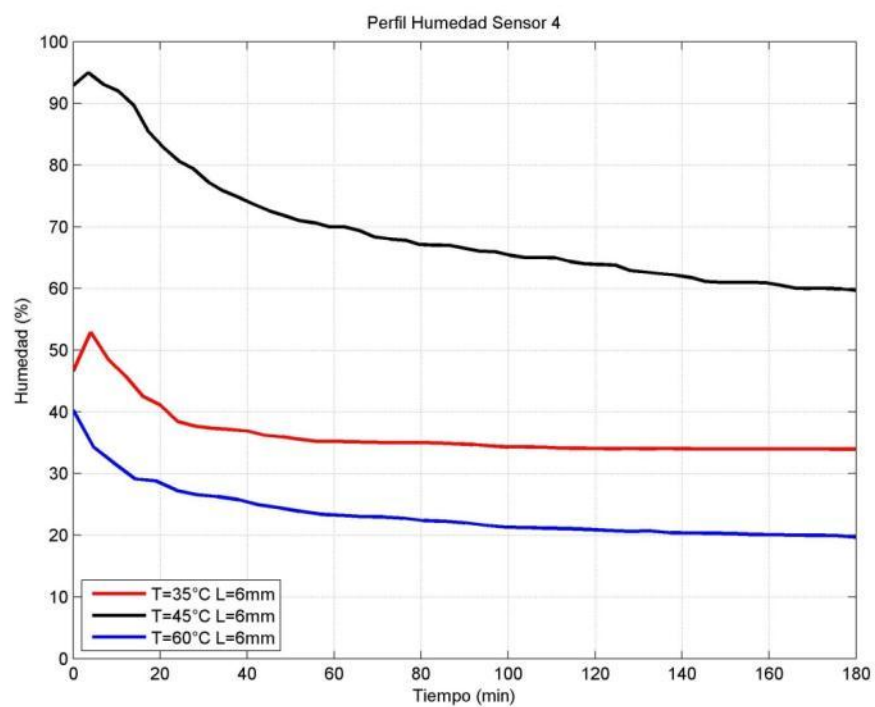


Figura 134. Perfil de humedad para el sensor 4 para longitud de fibra constante $L=6\text{mm}$

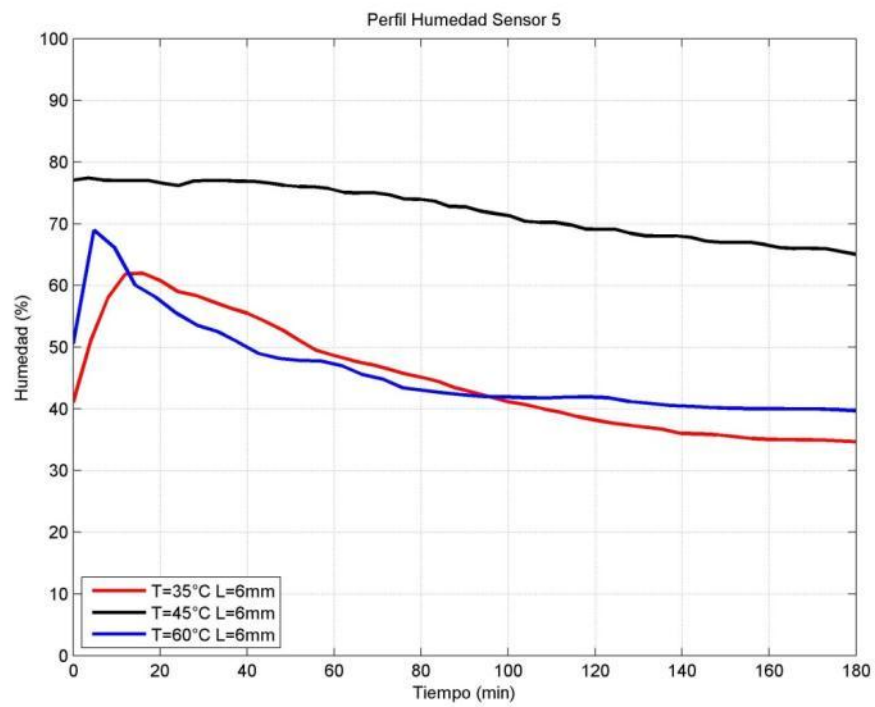


Figura 135. Perfil de humedad para el sensor 5 para longitud de fibra constante $L=6\text{mm}$

ANEXO 6. Perfiles de temperatura al interior de la cámara de secado

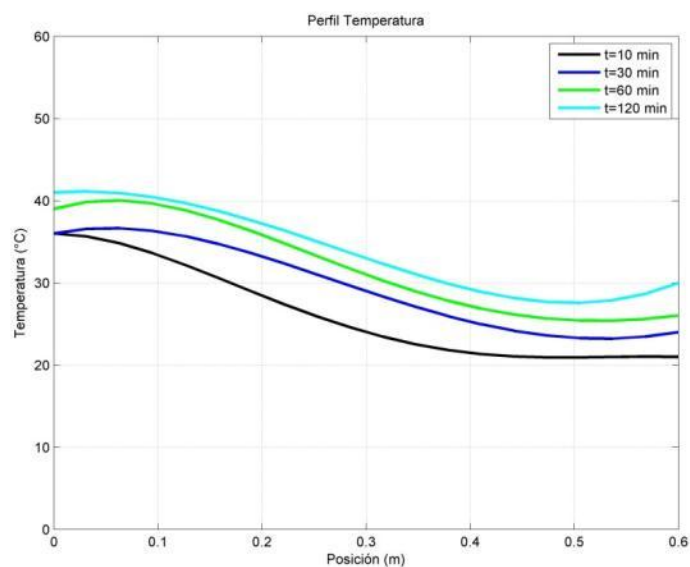


Figura 136. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{mm}$.

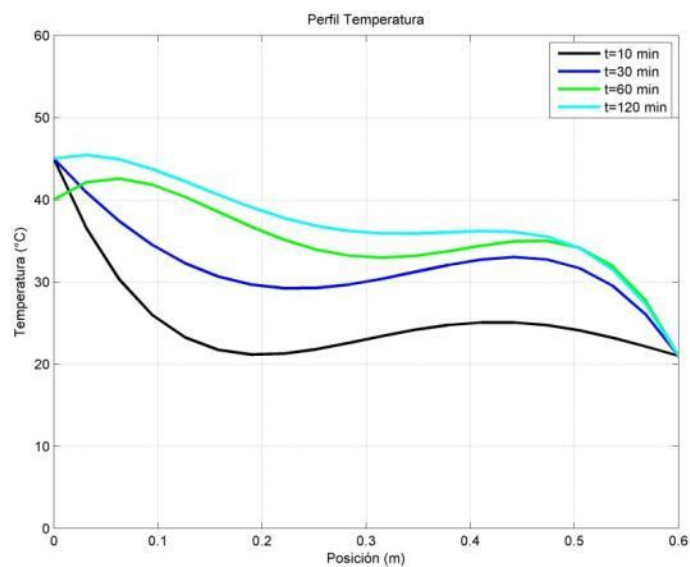


Figura 137. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{mm}$.

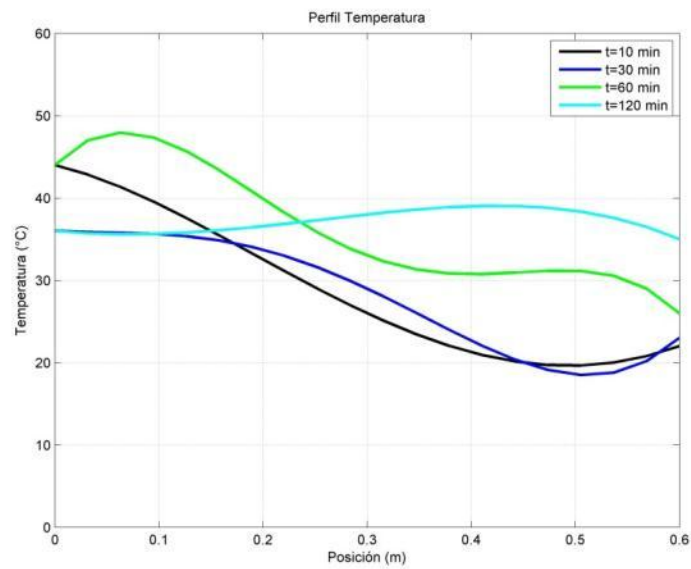


Figura 138. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=35^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{mm}$.

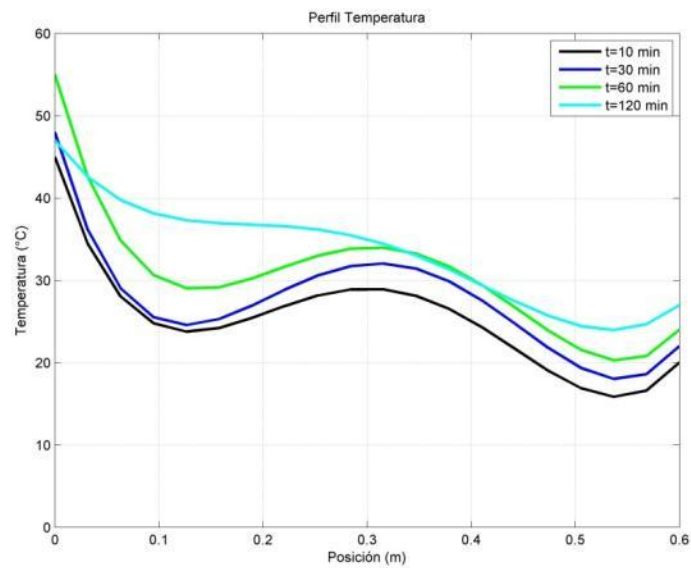


Figura 139. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{mm}$.

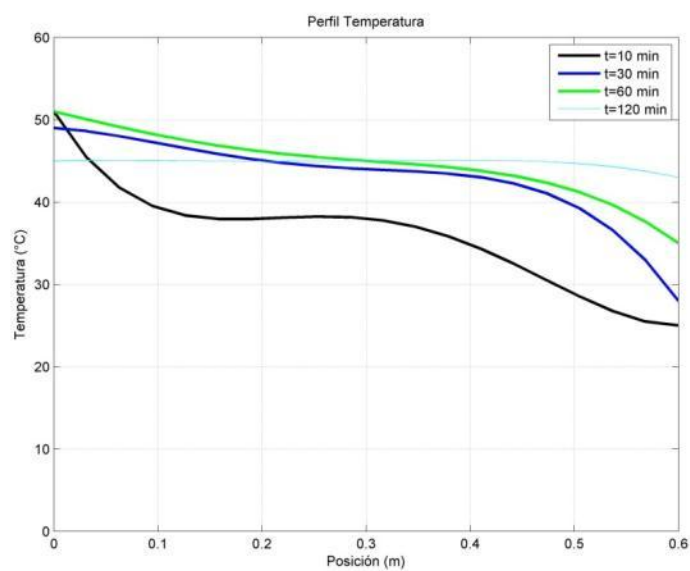


Figura 140. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{mm}$.

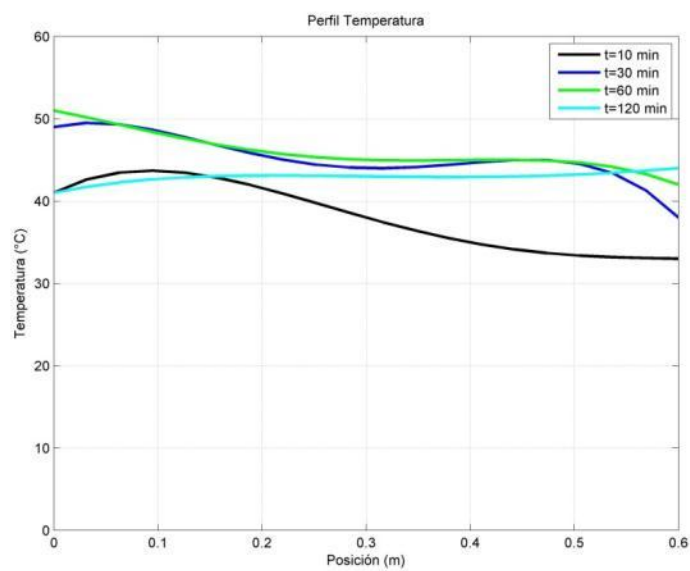


Figura 141. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=45^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{mm}$.

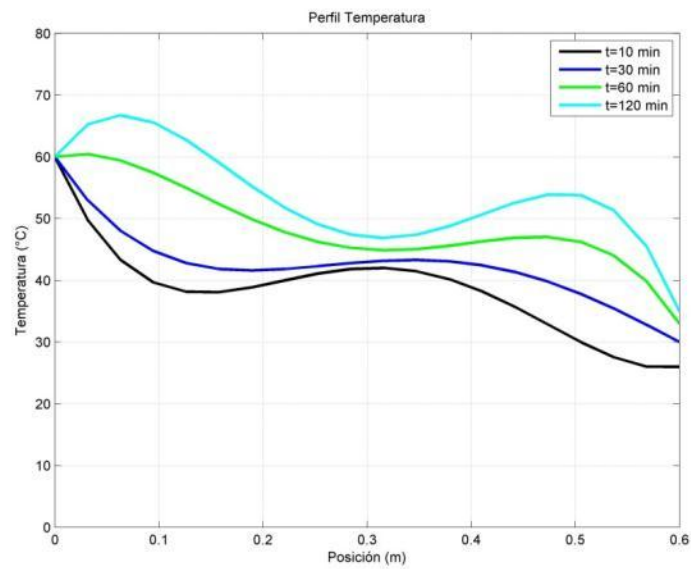


Figura 142. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=6\text{mm}$.

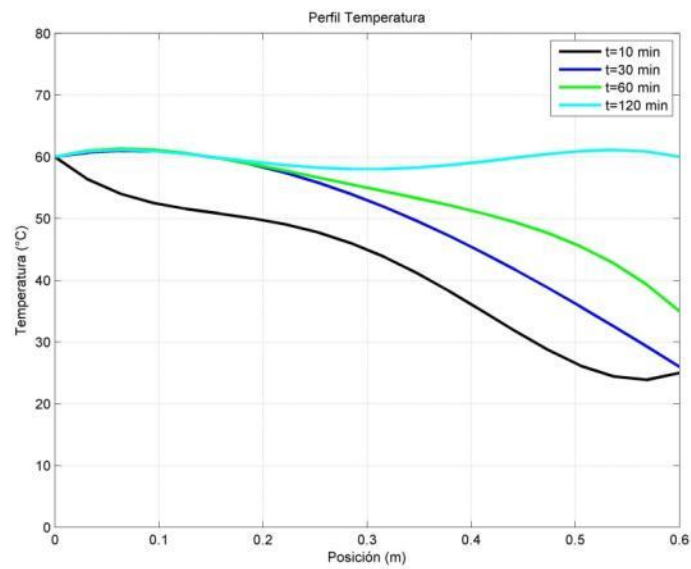


Figura 143. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=24\text{mm}$.

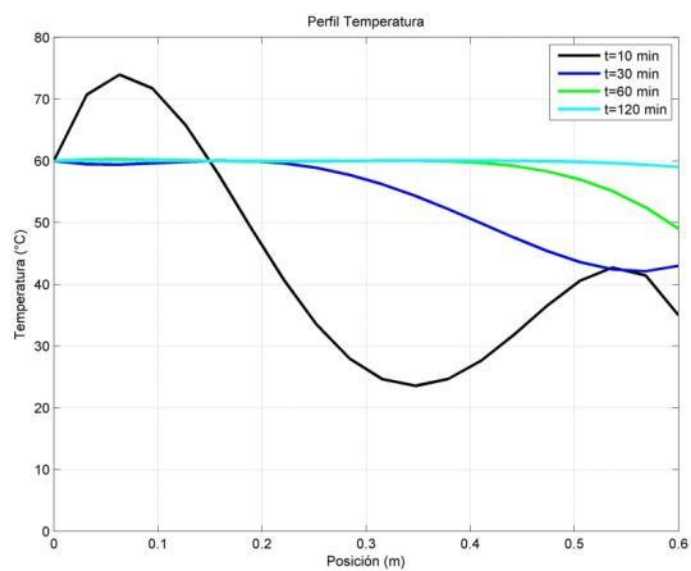


Figura 144. Perfil de temperatura en la cámara de secado $T=60^{\circ}\text{C}$ y $L=54\text{mm}$.

ANEXO 7. Perfiles de humedad en la cámara de secado

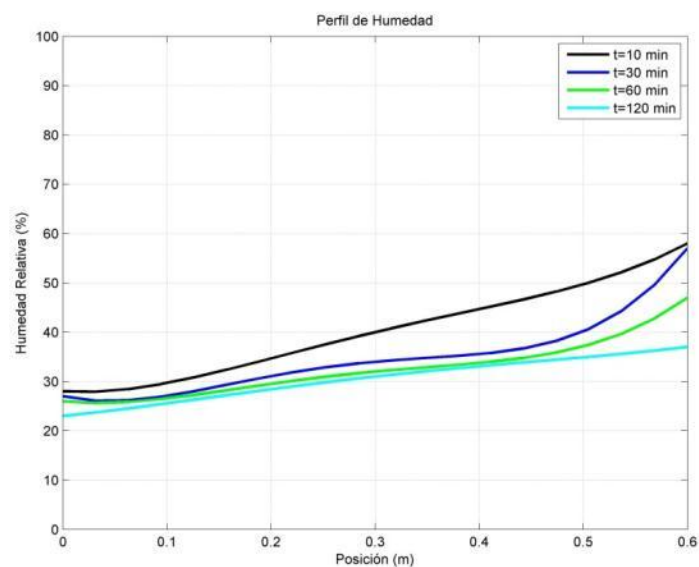


Figura 145. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
 $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=6\text{mm}$

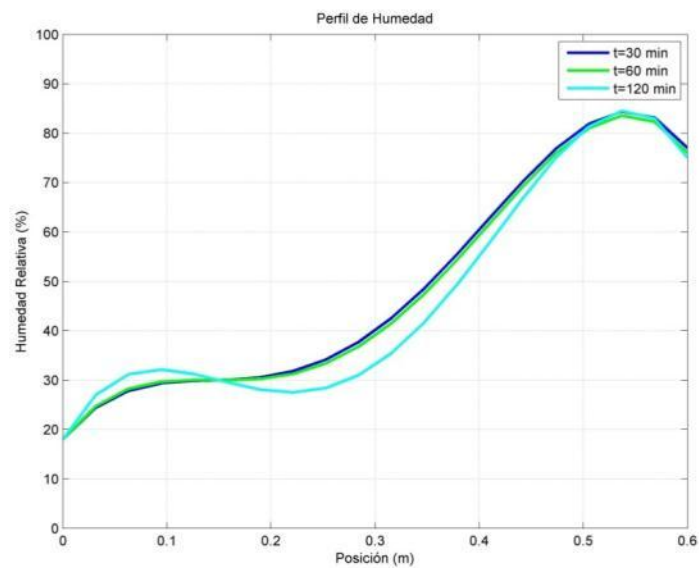


Figura 146. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
 $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=24\text{mm}$

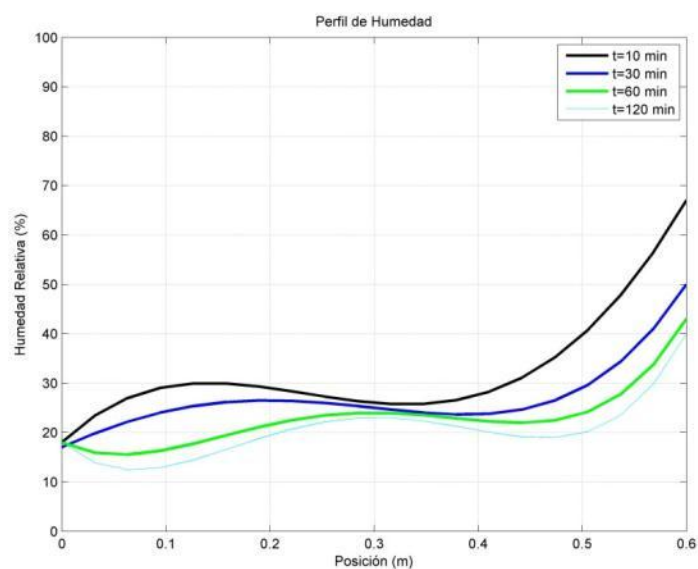


Figura 147. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
 $T=35^{\circ}\text{C}$ $L=54\text{mm}$

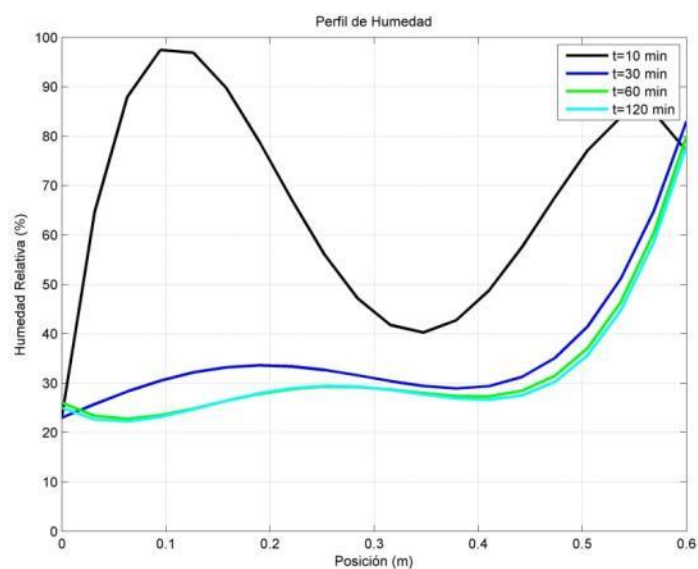


Figura 148. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
 $T=45^{\circ}\text{C}$ $L=6\text{mm}$

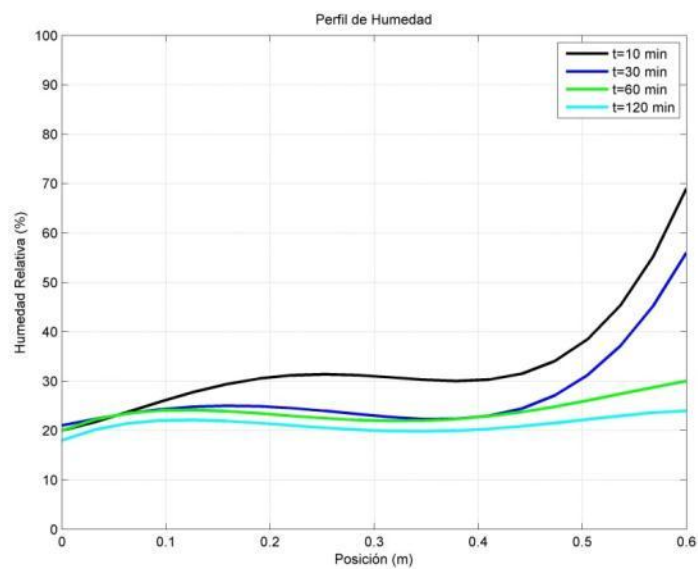


Figura 149. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
T=45°C L=24mm

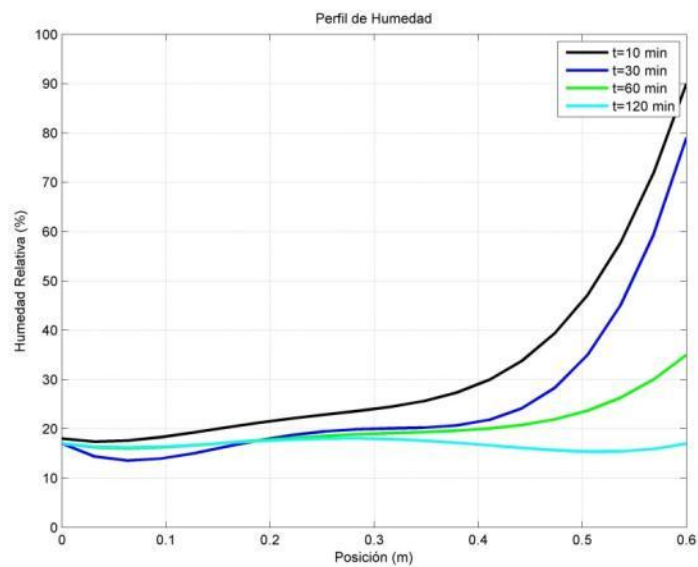


Figura 150. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
T=45°C L=54mm

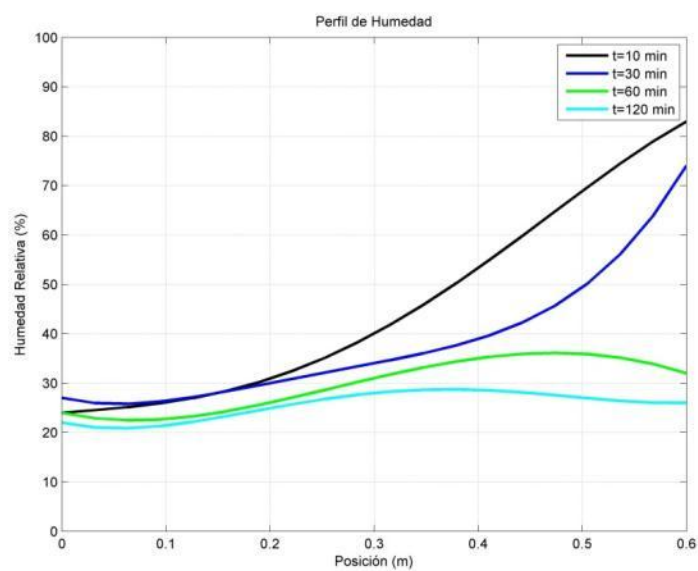


Figura 151. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
T=60°C L=6mm

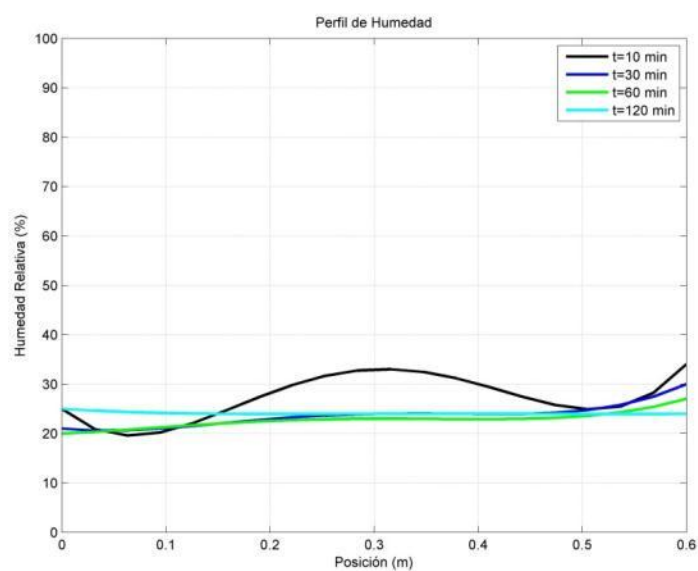


Figura 152. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
T=60°C L=24mm

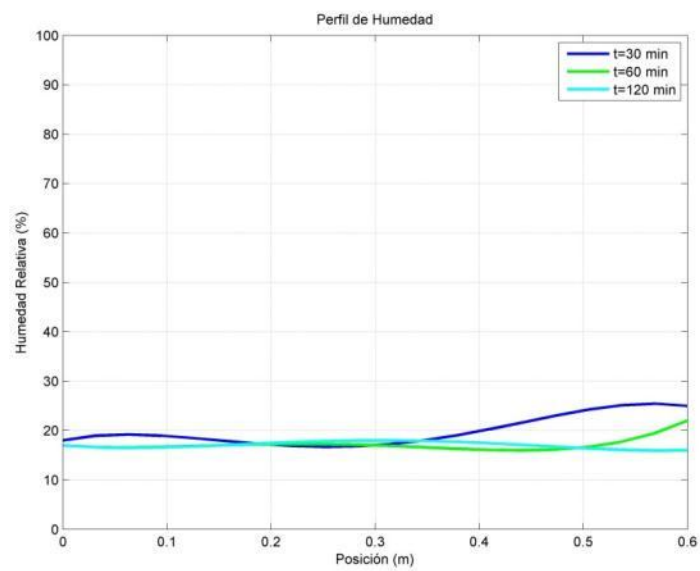


Figura 153. Perfil de humedad relativa del aire en el interior de la cámara de secado
 $T=60^{\circ}\text{C}$ $L=54\text{mm}$

ANEXO 8. Código Solución del Modelo de Luikov Modificado

```

clear all
close all
clc

Narchivo='Resultados Experimentales\111.xlsx';
%%%Verificación modelo con datos experimentales
[Mexperimental,MRe,Mdatos,M_Temp]=experimental(Narchivo);

%%%Parámetros conocidos%%%

Roo=120.1;%densidad del cuerpo seco kg/m^3
cq=2698;%capacidad calorifica J/kg.K
cm=0.5;%capacidad de humedad específica kgwet/kgdry
cp=1280;%capacidad del aire kgm^2/kgN
kp=0.5;%coeficiente de filtración de humedad Kg.m/s.N
km=0.1;%coeficiente de conductividad de humedad kg/m.h.°W
kq=160;%thermal conductivity W/m^2K
delta=0.25;%coeficiente de gradiente térmico 1/°K
epsilon=0.0001;%radio del coeficiente de difusión de vapor con el
coeficiente
    %total de difusión de humedad
lamda=2358;%Calor latente J/kg
L=0.6;%longitud de la cámara m
Tamb=320;%Temperatua del medio de secado
hl=340000;%coeficiente estimado de conductividad térmica kJ/m^2
h=0.1;%Coeficiente de transferencia de calor
hw=0.000000000012655;%coeficiente de transferencia de humedad
Mamb=0.000025;%Concentración de humedad en el medio

%%%Parámetros de entrada%%%

Cq=Roo*cq*delta/cm;
Cm=epsilon*lamda*Roo*cm;
Cp=-lamda*Roo*cp*kp/km;
K11=(kq+epsilon*lamda*km)*delta/cm;
K12=epsilon*lamda*delta/cm;
K21=epsilon*lamda*km*delta/cm;
K22=epsilon*lamda*km;
K13=epsilon*lamda*kp*delta/cm;
K31=epsilon*lamda*kp*delta/cm;
K33=-lamda*(1-epsilon)*kp^2/km;
K23=epsilon*lamda*kp;
K32=epsilon*lamda*kp;

%%% Solución del sistema de ecuaciones

numx=80;
dx=L/(numx-1);
x=0:dx:L;
numt=100000;
dt=3/numt;
dt1=3/5000;
dtw=1;

```

```

t=zeros(numt,1);
T=zeros(numx,numt);
M=zeros(numx,numt);
P=zeros(numx,numt);

%%valores iniciales
T(:,1)=293;
M(:,1)=50;

t(1)=0;

for i=1:numt-1

    for j=2:numx-1

        %Cálculo de tiempo
        t(i+1)=t(i)+dt;

        %Temperatura en la frontera de entrada
        if i<100
            T(1,i+1)=T(1,i)+0.03;
        else
            T(1,i+1)=Tamb;
        end

        %cálculo de temperaturas
        T(numx,i+1)=dt*K11/(cq*dx^2)*(T(numx-1,i)-2*T(numx,i)+(-
        (h*dx)/kq)*(Tamb-T(numx,i)))+T(numx,i))+T(j,i);
        T(j,i+1)=(dt*K11/(cq*dx^2))*(T(j-1,i)-
        2*T(j,i)+T(j+1,i))+T(j,i)...
        -(dt*K12/(Cq*dx^2))*(M(j-1,i)-2*M(j,i)+M(j+1,i)));

        %cálculo de Humedades
        M(1,i)=0.2;
        M(j,i+1)=-(dt*K21/(Cm*dx^2))*(T(j-1,i)-2*T(j,i)+T(j+1,i))...
        +(dt1*K22/(Cm*dx^2))*(M(j-1,i)-2*M(j,i)+M(j+1,i))+M(j,i);
        M(numx,i+1)=dt*K21/(Cm*dx^2)*(M(numx-1,i)-2*M(numx,i)+(-
        (hw*dx)/kq)*(Mamb-M(numx,i)))+M(numx,i))+M(j,i);

    end
end

x1=[0 0.15 0.30 0.45 0.60];

[fxint,f,x2]=interpolacion(Mexperimental(80,:));
[fxint2,f2,x22]=interpolacion(Mexperimental(6000,:));

Tk=T(:,100)-273.15;
Tk1=T(:,80000)-273.15;

plot(x,Tk,'LineWidth',2);
hold on

```

```

plot(x22,f,'rs','LineWidth',2);
hold on
plot(x,Tk1,'LineWidth',2);
hold on
plot(x2,f2,'rs','LineWidth',2);
grid on
legend('Teórico','Experimenta','Location','SouthWest')
title('Perfil de Temperatura')
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Temperatura (k)')
axis([0 0.6 0 60])

print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Temp_Luikov.jpg

Mk=M*0.01;

figure
plot(x,Mk(:,4000),'LineWidth',2);
hold on
plot(x,Mk(:,40000),'k','LineWidth',2);
grid on
title('Perfil de Humedad')
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Contenido de Humedad
 $\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{muestra}}}$ ','$','interpreter','Latex','fontsize',10)
axis([0 0.6 0 0.5])

print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Hum_Luikov.jpg

```

ANEXO 9. Código Solución del Modelo de Transferencia de Calor y Masa

```

clear all
close all
clc

Narchivo='Resultados Experimentales\111.xlsx';

%%Verificación modelo con datos experimentales
[Mexperimental,MRe,Mdatos,M_Temp]=experimental(Narchivo);

%%%%Variables de entrada
L=0.6;%Longitud de la cámara de secado (m)
Hi=0.5;%Humedad inicial de la muestra (%)
Ti=293;%Temperatura inicial (K)
Tf=330;%Temperatura del medio (K)
Mf=0.000025;%Concentración de humedad en el medio
hw=0.000000000012655;%coeficiente de transferencia de humedad
ro=120; %Densidad del bagazo de caña
Deff=0.0000000095;%Difusividad efectiva
Kt=160; %Conductividad Térmica
Cp=2968; %Calor específico del bagazo
Me=0.02;%Humedad de equilibrio
h=0.0072;%coeficiente de transferencia de calor

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Discretización%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
n=100;
t=50000;
dt=0.01;
dt1=100;
dx=(L)/(n-1);
x=0:dx:L;
T=zeros(n,t);
M=zeros(n,t);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Condiciones Iniciales%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:n
    M(i,1)=Hi;
    T(i,1)=Ti;
end
ti=zeros(t,1);
ti(1,1)=0;
for i=1:t-1
    ti(i+1,1)=ti(i,1)+dt;
    for j=2:(n-1)
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %Perfil de Humedad%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        M(1,i+1)=Me;
        M(n,i+1)=dt1*Deff*(M(n-1,i)-2*M(n,i)+(-hw*dx)/Deff*(Mf-
M(n,i))+M(n,i))/dx^2+M(n,i);
        M(j,i+1)=M(j,i)+(dt1*Deff)/dx^2*(M(j-1,i)-2*M(j,i)+M(j+1,i));
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %Perfil de Temperatura%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if i<1000
            T(1,i+1)=T(1,i)+0.03;
        else
            T(1,i+1)=320;
        end
    end
end

```

```

        end

        T(n,i+1)=dt*(Kt/(ro*Cp))*(T(n-1,i)-2*T(n,i)+(-h*dx)/Kt*(Tf-
T(n,i))+T(n,i))/dx^2+T(n,i);
        T(j,i+1)=T(j,i)+((dt*Kt)/(ro*Cp*dx^2))*(T(j-1,i)-
2*T(j,i)+T(j+1,i));
    end
end

N=size(T);
n=N(1,1);
Par=10;
div=n/Par;
k=fix(div);
xx=linspace(0,0.6,k);

x1=[0 0.15 0.30 0.45 0.60];

[fxint,f,x2]=interpolacion(Mexperimental(20,:));
[fxint2,f2,x22]=interpolacion(Mexperimental(6000,:));

Tk1=T(:,100)-273.15;
Tk2=T(:,20000)-273.15;

figure
plot(x,Tk1,'LineWidth',2);
hold on
plot(x2,f,'r-*','LineWidth',2);
hold on
plot(x,Tk2,'LineWidth',2);
hold on
plot(x22,f2,'r-*','LineWidth',2);
axis([0 0.6 0 60]);
grid on
title('Perfil de Temperatura (°C)');
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Temperatura (°C)');
legend('Teórico', 'Experimental')

print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Temp_TransCaloryMasa.jpg

figure
plot(x,M(:,4000),'r','LineWidth',2);
hold on
plot(x,M(:,50000),'k','LineWidth',2);
axis([0 0.6 0 0.5]);
grid on
title('Perfil de Humedad
 $\frac{kg_{agua}}{kg_{muestra}}$ ','$','interpreter','Latex','fontsize',10);
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Humedad
 $\frac{kg_{agua}}{kg_{muestra}}$ ','$','interpreter','Latex','fontsize',10);

print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Humedad_TransCaloryMasa.jpg

```

ANEXO 10. Código Solución Modelo de Chauhan

```

clear all
close all
clc

Narchivo='Tam1_Tem45_1.xlsx'; %Lectura del archivo

%%Verificación modelo con datos experimentales
[Mexperimental,MRe,Mdatos,M_Temp]=experimental(Narchivo);

%%Definición de constantes
M=100; %número de particiones radiales
t=40000; %número de particiones temporales
L=0.60; %Longitud de la cámara de secado
dx=L/(M-1); %Incremento dimensional
x1=0:dx:L;
dt=3/t; %incremento temporal
dt1=1600000000/t;
dT=0.000001; %Incremento en la temperatura

%definición de constantes%
a1=1;%constante del modelo
a2=1;%constante del modelo
a3=1;%constante del modelo
a4=1;%constante del modelo
hcam=0.2; %Alto de la cámara de secado
Tflu=35;
bcam=0.3; %base de la cámara de secado
mair=0.145; %flujo másico en kg/s
Atran=hcam*bcam;%cálculo del área de la cámara de secado
rof=1.113; %Densidad del aire a 50°C
Egb=0.01; %velocidad de flujo
Cf=3904.4; % Capacidad específica
Cv=0.002; % Capacidad específica de vapor de agua en el aire
Lam1=0.0006; %Relación de humedad en el aire de secado
Ggb=mair*3600/Atran;%velocidad del aire en la cámara de secado
rogr=120; %densidad del material a secar
Cgr=1.12; %Calor específico del material a secar
Cw=1.49; %Calor específico del agua en el material
Mt=0.5; %Contenido de humedad
Tf=50; %Temperatura inicial de medio de secado
Patm=1; %Presión atmosférica Bogotá
hvgr=12800; %Coeficiente transferencia de calor volumétrico
hvfgr=460;%Coeficiente de
k=0.000000292; %Difusividad de líquido
K=161;%Conductividad térmica del bagazo
hw=0.0072;%Coeficiente de conducción de calor x=L
%%Definición de coeficientes
a=rof*Egb*(Cf+Cv*Lam1);
b=Ggb*(Cf+Cv*Lam1);
c=rogr*(Cgr+Cw*Mt);

```



```

hfg=2460.0-2.386*(Tf+273);
d=hfg*Ggb;
e=-rogr/Ggb;
Ps=exp(52.576-6790.5/(Tf+273)-5.0281*log(Tf+273));
fi=Patm*Lam1/(Ps*(0.622+Lam1));
%%%Planteamiento de Ecuaciones
Tf=zeros(M,t);
Tf(:, :)=20;
Tgr=zeros(M,t);
Tgr(:, :)=20;
Lam=zeros(M,t);
Lam(:, :)=0.006;
Mt=zeros(M,t);
Me=zeros(M,1);
Mt(:,1)=0.5;
Mt(1,:)=0.5;
for i=1:t-1
    for j=2:M-1

        %Temperatura del Aire
        if i<100
            Tf(1,i+1)=Tf(1,i)+0.3;
        else
            Tf(1,i+1)=50;
        end

        if i<10000
            Tgr(1,i+1)=Tgr(1,i)+0.003;
        else
            Tgr(1,i+1)=50;
        end

        Tf(j,i+1)=dt/a*(hvfgr*(Tgr(j,i)-Tf(j,i))-(b*(Tf(j,i)-Tf(j-1,i)))/2*dx)+Tf(j,i);

        Tf(M,i+1)=(dt*b/a*(hw/K*(Tflu-Tf(M,i))+Tf(M,i)-Tf(M,i))/2*dx)+Tf(M,i);

        %Temperatura del bagazo

        Tgr(j,i+1)=dt/c*(hvfgr*(Tf(j,i)-Tgr(j,i))-hfg*(Lam(j,i)-Lam(j-1,i))/dx)+Tgr(j,i);

        Tgr(M,i+1)=Tgr(M-1,i+1);

        %relación de humedad
        Me(i)=0.2;
        Lam(j,i)=e*dx^2*(Mt(j-1,i)-Mt(j,i))/dT +Lam(j-1,i);
        Lam(1,i)=0.01;
        %Humedad de la muestra

```

```

        Mt(1,i+1)=Me(1);

        Mt(j,i+1)=dt1*-k*(Mt(j,i)-Me(j,1))+Mt(j+1,i);
        Mt(M,i+1)=Mt(M-1,i+1);
    end
end

N=size(Tf);
n=N(1,1);
Par=10;
div=n/Par;
k=fix(div);
xx=linspace(0.06,0.6,k);

for i=0:k-1
    for j=1:Par
        TF(j)=Tf(i*Par+j,1000);
    end
    Tft(:,i+1)=TF;
end

x=[0 0.15 0.30 0.45 0.60];

[fxint,f,x2]=interpolacion(Mexperimental(80,:));
[fxint2,f2,x22]=interpolacion(Mexperimental(12000,:));

figure
tr=1:1:t;
Mr=1:1:M;
plot(x1,Tf(:,40000),'LineWidth',2);
hold on
plot(x2,f,'-rs','LineWidth',2);
hold on
plot(x1,Tf(:,30),'LineWidth',2);
hold on
plot(x22,f2,'-rs','LineWidth',2);
axis([0 0.6 0 60]);
grid on
legend('Teórico','Experimenta','Location','SouthWest')
title('Temperatura en la Cámara de Secado');
xlabel('Posición (m)');
ylabel('Temperatur (°C)');
print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Temp_Chauhan.jpg

figure
tr=1:1:t;
Mr=1:1:M;
plot(x1,Tgr(:,6000),'LineWidth',2);
hold on
plot(x1,Tgr(:,40000),'LineWidth',2);
axis([0 0.6 0 60]);
grid on
title('Temperatura Muestra');

```

```

xlabel('Posición (m)');
ylabel('Temperatura (°C)');
print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Temp_muestra_Chauhan.jpg

figure
plot(x1,Mt(30,1:100),'LineWidth',2);
grid on
title('Humedad de la Muestra');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Contenido de Humedad
 $\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{muestra}}}$ ','$','interpreter','Latex','fontsize',10);
axis([0 0.6 0 0.5]);
print -djpeg -r300 E:\modelos\Per_Humed_Chauhan.jpg

```

ANEXO 11. Código para el filtrado de los datos experimentales

```
function [Datos_Filtrados, Humedad_Filtrada, tam]=Filtrado(Narchivo, column)

Matriz=xlsread(Narchivo);

Datos=Matriz(:, column);

N=size(Datos);
n=N(1,1);
Par=200;
div=n/Par;
k=fix(div);

for i=0:k-1
    for j=1:Par
        Datos1(j)=Datos(i*Par+j);
    end
    Datos_Filtrados(i+1)=mean(Datos1);
end

    mw1=Matriz(1,11)*0.5;
    mt=Matriz(1,11);
    Mi=50;
    mw=mw1;
    Humedad(1,1)=Mi;
    for i=1:n-1
        mt(i+1)=mt(i)-(Matriz(i,11)-Matriz(i+1,11));
        mw(i+1)=mw(i)-(Matriz(i,11)-Matriz(i+1,11));
        Humedad(i+1)=mw(i)/mt(i)*100;
    end

    MRe=Humedad/Mi;

for i=0:k-1
    for j=1:Par
        Datos1(j)=MRe(i*Par+j);
    end
    Humedad_Filtrada(i+1)=mean(Datos1);
end

tam=linspace(0,180,k);

end
```

ANEXO 12. Ejemplo de solución modelos empíricos

```

clear all
close all
clc

%%Definición de parámetros de entrada
k1=0.0006;%constante de la función
k2=0.00085;%constante de la función
k3=0.0009;%constante de la función
Narchivo1='Resultados Experimentales\112.xlsx';
Narchivo2='Resultados Experimentales\121.xlsx';
Narchivo3='Resultados Experimentales\132.xlsx';

%%Verificación modelo con datos experimentales
[Mexperimental1,MRe1,n1]=experimental(Narchivo1);
[Mexperimental2,MRe2,n2]=experimental(Narchivo2);
[Mexperimental3,MRe3,n3]=experimental(Narchivo3);

t1=linspace(0,180,n1);
t2=linspace(0,180,n2);
t3=linspace(0,180,n3);
%%Modelo de Bruce
MR1=exp(-k1*t1);
MR2=exp(-k2*t2);
MR3=exp(-k3*t3);

%Cálculo de precisión
R1=corr2(MRe1,MR1);
[h1,p1,ci1]=ttest2(MRe1,MR1,[],[],'unequal');
RMSE1=0;

for i=1:n1
    RM=(1/n1*(MRe1(i)-MR1(i))^2)^(1/2);
    RMSE1=RMSE1+RM;
end

R2=corr2(MRe2,MR2);
[h2,p2,ci2]=ttest2(MRe2,MR2,[],[],'unequal');
RMSE2=0;

for i=1:n2
    RM=(1/n2*(MRe2(i)-MR2(i))^2)^(1/2);
    RMSE2=RMSE2+RM;
end

R3=corr2(MRe3,MR3);
[h3,p3,ci3]=ttest2(MRe3,MR3,[],[],'unequal');

RMSE3=0;

for i=1:n3
    RM=(1/n3*(MRe3(i)-MR3(i))^2)^(1/2);
    RMSE3=RMSE3+RM;
end

```

end

```
%plotea gráficas (experimental - teórica)
figure
subplot(2,2,1)
    plot(t1,MR1,'b');
    hold on
    plot(t1,MRe1,'b*-')
    grid on;
    title('Perfil de Humedad T=35°C L=6mm')
    xlabel('tiempo (min)')
    ylabel('W_t (%)')
    legend('Teórico','Experimental','Location','SouthWest')

subplot(2,2,2)
    plot(t2,MR2,'r');
    hold on
    plot(t2,MRe2,'r*-')
    grid on;
    title('Perfil de Humedad T=35°C L=24mm')
    xlabel('tiempo (min)')
    ylabel('W_t (%)')
    legend('Teórico','Experimental','Location','SouthWest')

subplot(2,2,3)
    plot(t3,MR3,'k');
    hold on
    plot(t3,MRe3,'k*-')
    grid on;
    title('Perfil de Humedad T=35°C L=54mm')
    xlabel('tiempo (min)')
    ylabel('W_t (%)')
    legend('Teórico','Experimental','Location','SouthWest')

print -djpeg -r500 E:\modelos\Modelo_Bruce_1.jpg
```